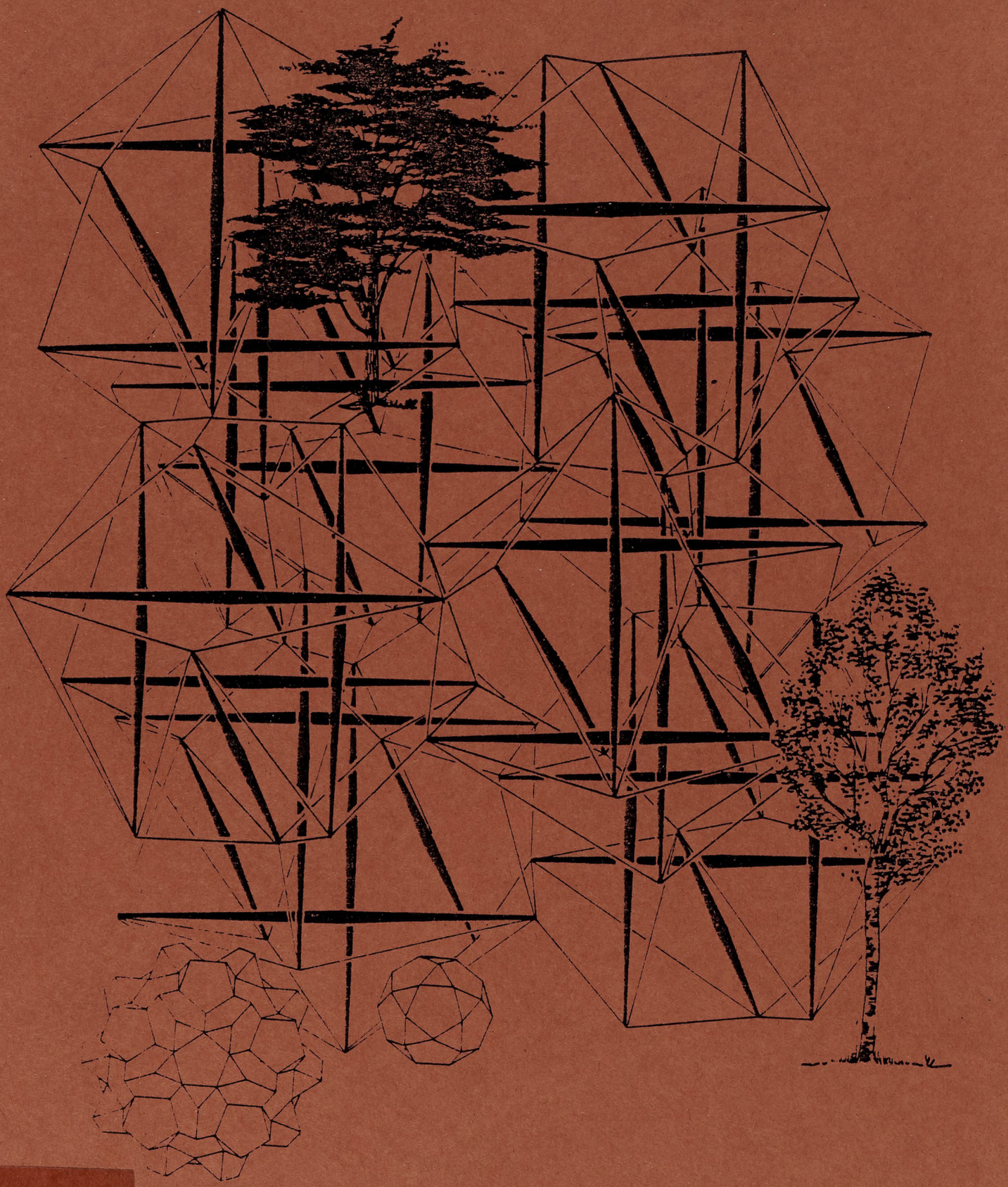
POSSIBILITES D'APPLICATION DES STRUCTURES AUTOTENDANTES

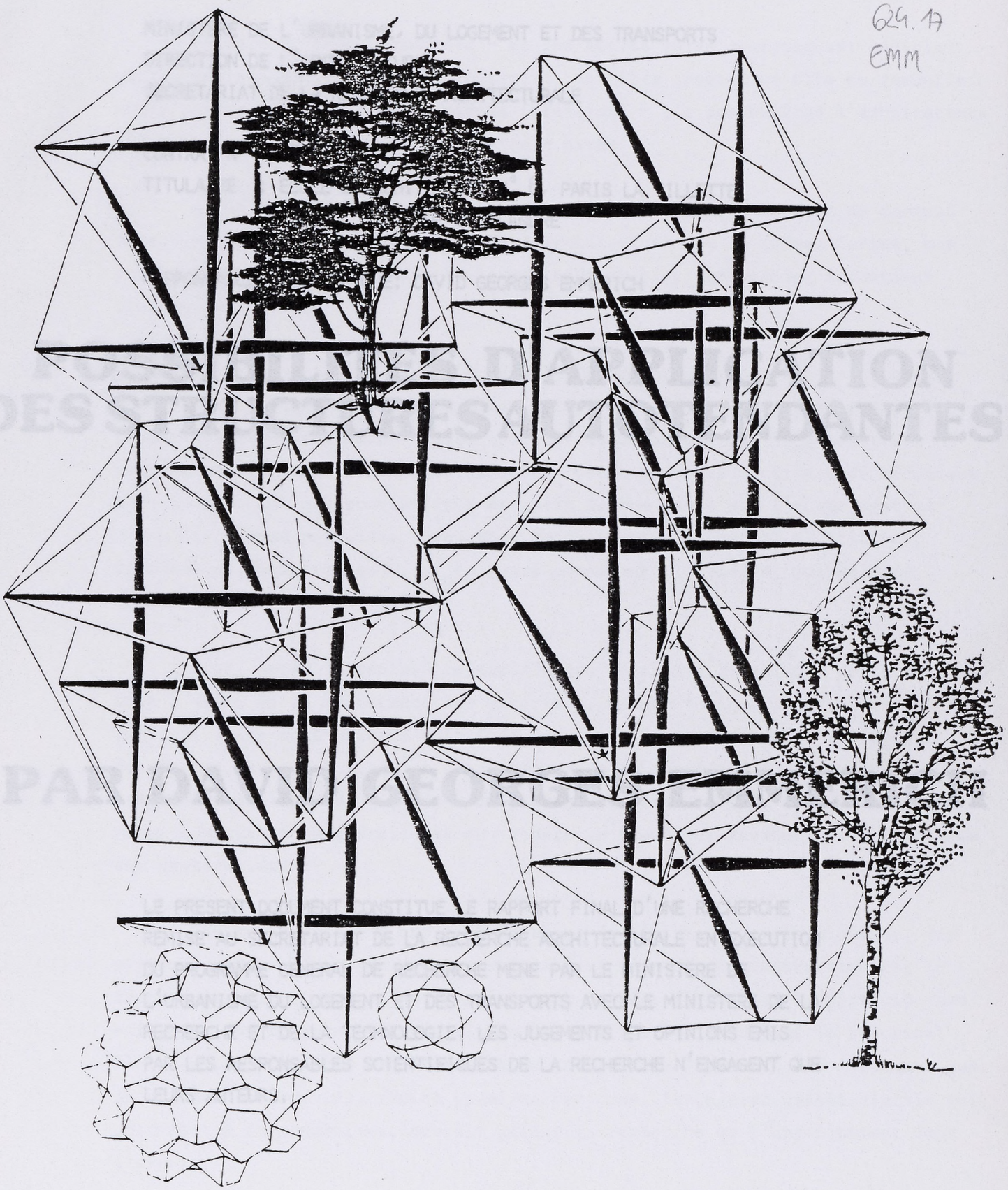


PAR DAVID GEORGES EMMERICH

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

POSSIBILITES D'APPLICATION DES STRUCTURES AUTOTENDANTES

624.17
EMM



PAR DAVID GEORGES EMMERICH

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

MINISTERE DE L'URBANISME, DU LOGEMENT ET DES TRANSPORTS
DIRECTION DE L'ARCHITECTURE
SECRETARIAT DE LA RECHERCHE ARCHITECTURALE

CONTRAT N° : 84 01 374

TITULAIRE : ECOLE D'ARCHITECTURE N° 6, PARIS LA VILLETTE
75019 144, RUE DE FLANDRE

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE: DAVID GEORGES EMMERICH

POSSIBILITES D'APPLICATION DES STRUCTURES AUTOTENDANTES

PAR DAVID GEORGES EMMERICH

LE PRESENT DOCUMENT CONSTITUE LE RAPPORT FINAL D'UNE RECHERCHE REMISE AU SECRETARIAT DE LA RECHERCHE ARCHITECTURALE EN EXECUTION DU PROGRAMME GENERAL DE RECHERCHE MENE PAR LE MINISTERE DE L'URBANISME DU LOGEMENT ET DES TRANSPORTS AVEC LE MINISTERE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE. LES JUGEMENTS ET OPINIONS EMIS PAR LES RESPONSABLES SCIENTIFIQUES DE LA RECHERCHE N'ENGAGENT QUE LEURS AUTEURS.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

LA FORME CREE LA FONCTION!

L'approche fonctionnaliste - et les autres voies analytiques: sociologiste, environnementaliste, écologiste... derrière lesquelles elle se camoufle ou se perfectionne, pleine de bonnes intentions - n'a pas empêché l'architecture de descendre en enfer, pavé surtout de - pavés.

Après cet équarrissage aux poétiques angles droits, il faut de nouveau admettre que la substance majeure de l'architecture est la forme. Certes, non pas la forme formaliste, mais la forme indéformable, composable, industrialisable...

La crise actuelle est au fond une crise de production: qui est rigide, insuffisante, chère à la consommation; alors qu'elle devrait développer des techniques architecturales nouvelles, utilisant correctement les matériaux nouveaux et les méthodes industrialisées. Cette nouvelle architecture répondant et correspondant aux possibilités de notre époque passe par l'étude systématique des formes porteuses adéquates: autoportantes, légères, répétitives, démontables, modifiables... et de leurs composants: standard, polyvalents, réemployables...

Bref, après la période moderniste qui réduisait la science de la construction à celle de la résistance des matériaux, assurant ainsi la primauté à l'ingénieur, l'âge post-moderne doit faire renaître la science de la résistance des formes, et en général les connaissances morphologiques touchant leurs propriétés qualitatives; notions proprement architecturales, dont le rôle mieux compris ne manquerait pas de rendre la place qui revient de ce fait même aux architectes.

Concevoir, grâce à ces connaissances des infrastructures urbaines, des systèmes mécano, des jeux de constructions et même d'autoconstruction est la tâche primordiale. Une architecture à deux degrés, fondée sur la participation effective des usagers, individuels ou collectifs. Et, foin pour la fonction! Il est plus proprement architectural de réapprendre à dresser les matériaux que de dresser les humains. Vérité première vers une alternative architecturale qui, post-mortem du modernisme, devrait guider la recherche et l'enseignement dans l'avenir.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

L'HISTORIQUE DES STRUCTURES AUTOTENDANTES

Pour comprendre l'importance du développement des structures autotendantes dans l'architecture,réduite jusqu'à maintenant à des modes de construction monolithiques et relativement lourds, on doit évoquer la véritable rupture technologique provoquée en matière d'habillement par la découverte des méthodes de tissage et l'abandon consécutif de la peau de bête.

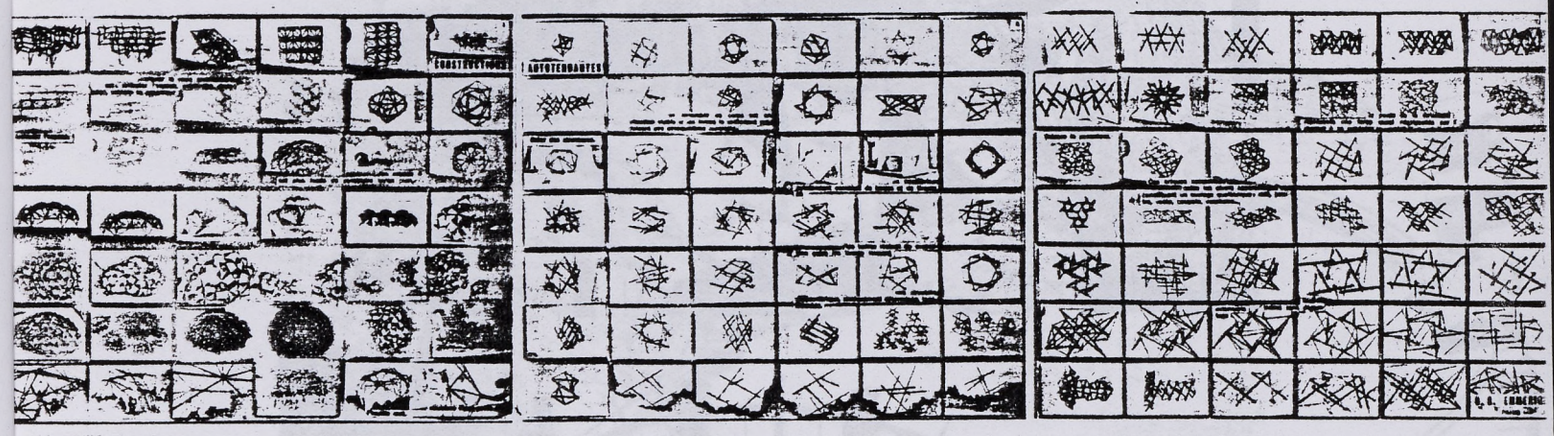
Indéniablement, à un moment ou à un autre de la préhistoire, l'expansion des humains aurait été bloquée sans cette invention révolutionnaire si leur existence avait continué d'être conditionnée par celle des animaux. De même aujourd'hui, l'évolution de toute la société, désormais urbaine et hautement industrialisée, paraît être compromise par les tares d'un mode de consommation et de production d'espace qui est resté dérivé du rural et de l'artisanal.

Fondées sur la répétitivité des composants industrialisés et sur l'utilisation de très peu de matériaux de haute résistance, donc essentiellement tendus, les structures autotendantes répondent aux problèmes actuels de l'environnement. Plus légères et incomparablement plus solides et aussi plus riches en formes architectoniques nouvelles que les techniques obsolètes en usage, leur développement ne manquera pas de provoquer en matière d'habitat humain une nouvelle rupture technologique.

L'acte de naissance officiel des structures autotendantes a été enregistré le 27 Juin 1959 à 10h 6m au Ministère de l'Industrie, Service de la Propriété Industrielle, 26, Rue de Léningrad à Paris, où a été déposé un premier brevet d'invention concernant des "Organes d'assemblage pour charpente, en particulier pour l'industrie du bâtiment" et qui décrivait une structure où "un cable traversant les éléments et les organes d'assemblage intermédiaires court tout le long de la charpente ainsi constituée et est arrimé à ses extrémités, assurant ainsi la solidarisation des divers éléments et la constitution d'une charpente en forme de chaîne à laquelle on peut donner des dispositions très variées".

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

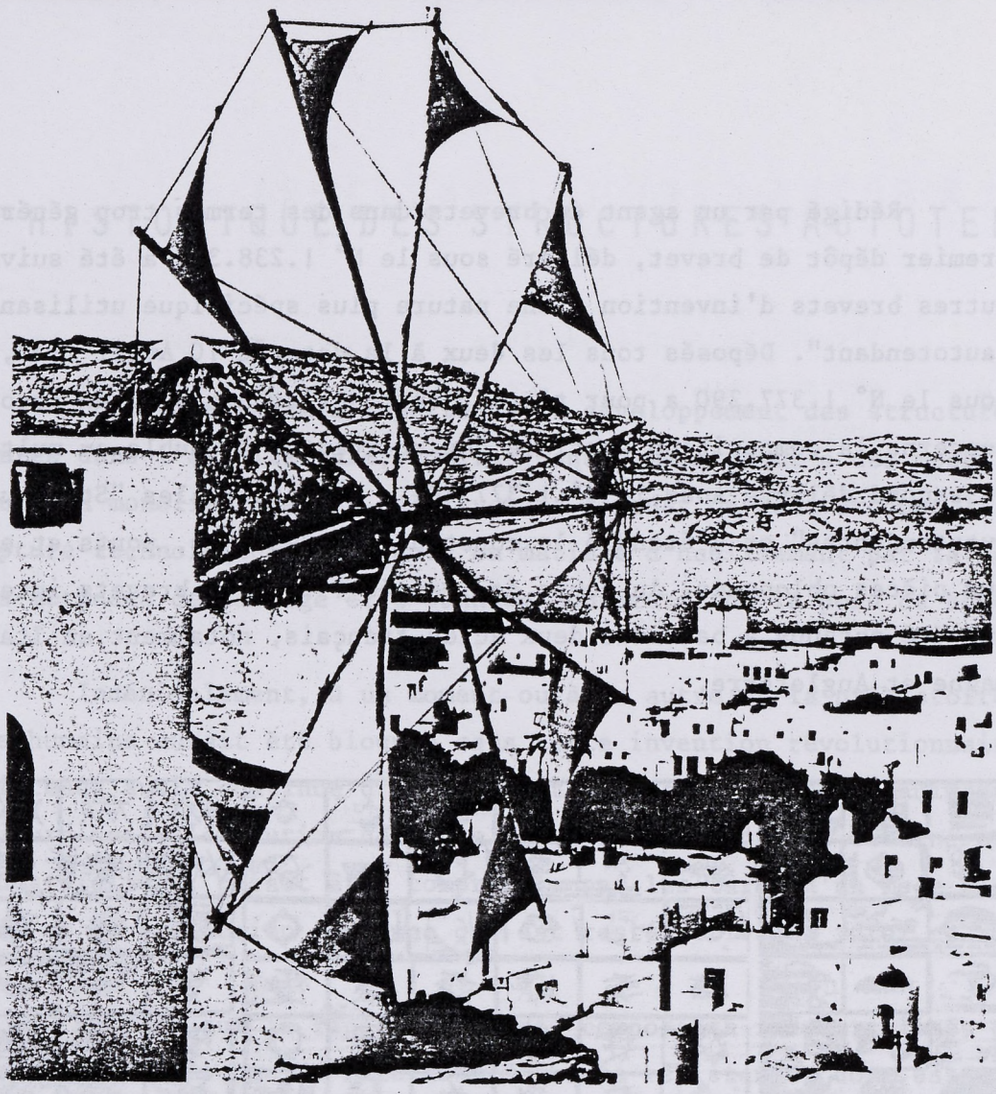
Rédigé par un agent de brevets dans des termes trop généraux, ce premier dépôt de brevet, délivré sous le N° 1.238.308 a été suivi de deux autres brevets d'invention d'une nature plus spécifique utilisant le terme "autotendant". Déposés tous les deux à la date du 10 Avril 1963, l'un délivré sous le N° 1.377.290 a pour titre "Construction des réseaux autotendants" et concerne la composition spatiale des charpentes à double ou multiples couches; le second délivré sous le N° 1.377.291 a pour titre les "Structures linéaires autotendantes" et s'étend à la construction des mâts, ponts et en général aux pièces oblongues. Au cours de l'année 1964, des brevets internationaux ont été obtenus à base des deux actes français, notamment en Italie, Allemagne et Angleterre.



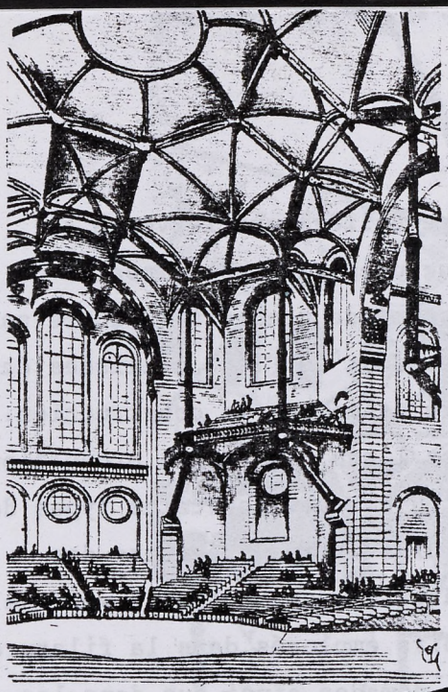
En fait, entre ces deux dates 1959-1964, pratiquement toutes les combinaisons autotendantes étaient découvertes et inventoriées par un travail d'une extrême intensité, motivé par mes convictions de pouvoir faire évoluer l'architecture par les innovations techniques.

Faisant parti dès sa fondation, en 1956, du Groupe d'Etude d'Architec-Mobile, GEAM, où figuraient entre autres, Oscar Hansen, Günther Günschel, Frei Otto, Eckhardt Schulze-Fielitz, Jerzy Soltan, je participais, en effet, par la présentation des résultats de mes recherches à toutes les manifestations organisées: expositions itinérantes, colloques et publications. Grâce à cette activité de propagande, jusqu'à la disparition de ce groupe et également par mes articles parus pendant et après cette période dans les revues techniques et aussi par les séminaires de pédagogie active organisés dans les écoles françaises et étrangères, les structures autotendantes seront connues sinon répandues.

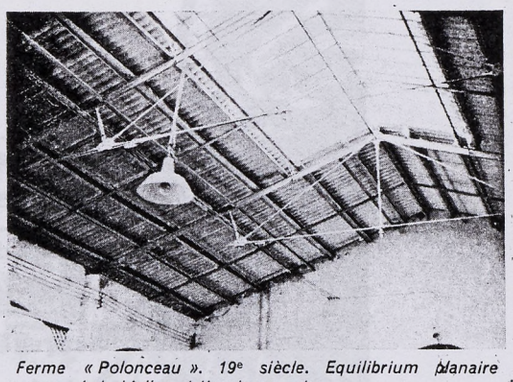
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE



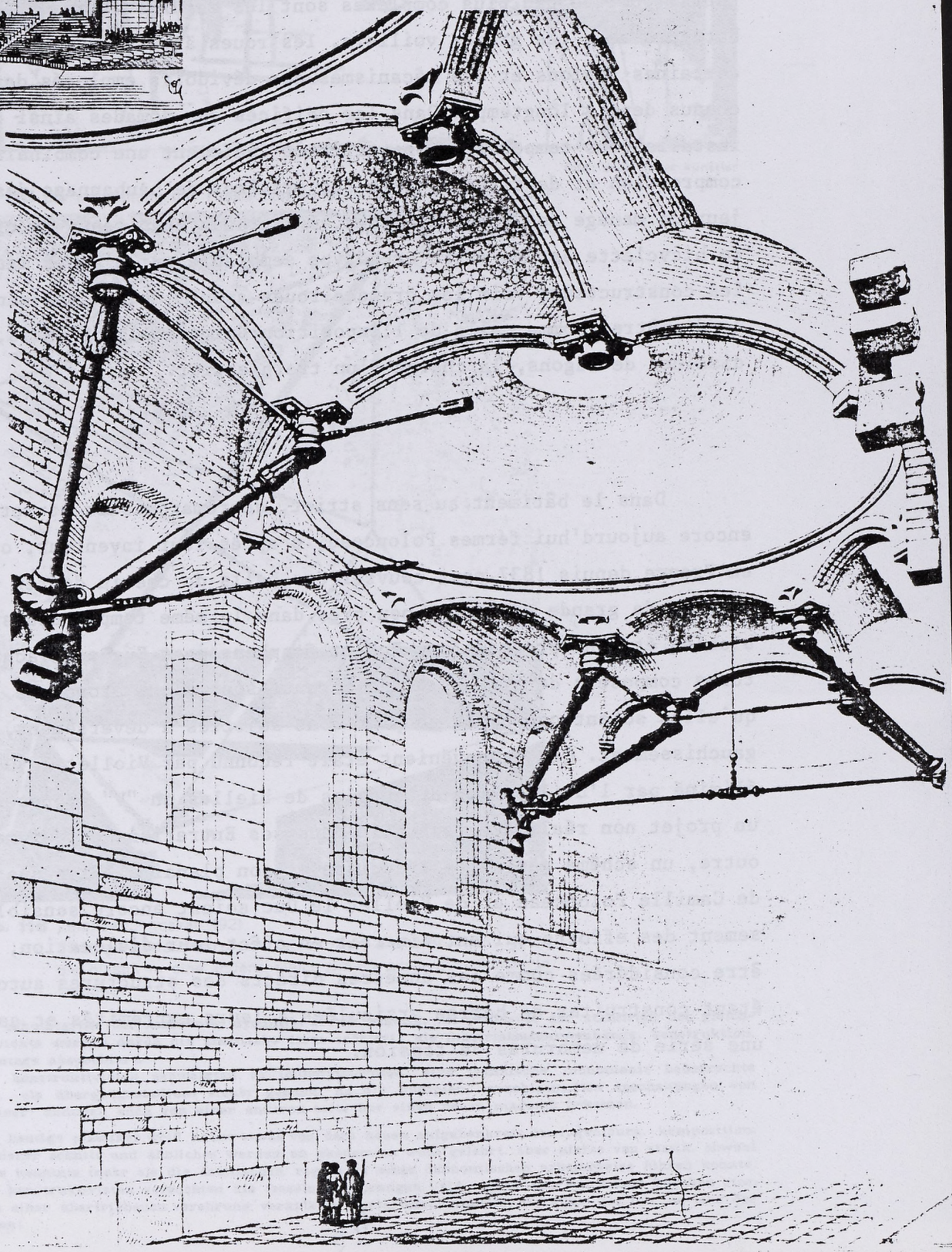
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE



Viollet-le-Duc: *Entretiens*, 1872.



Ferme « Polonceau ». 19e siècle. Equilibrium planaire composé de bielles et tirants en acier.



Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Mais, préalablement à cette période particulièrement fervente et féconde de mon activité d'architecte, les structures tendues composées de barres de compression, d'une part, et d'un système de tendeurs, d'autre part, existaient déjà. Certaines formes primitives avaient été utilisées dans le passé à une autre échelle ou pour un autre usage que la construction. La composition la plus simple et fort ancienne est l'arc, l'arme de propulsion assemblée d'une barre et d'un tirant uniques d'où dérivent certains types de ponts. Quelque peu plus complexes sont les mâtures et les gréements des bateaux, tels les grands voiliers, les roues à pales des moulins à vent de certaines régions et les mécanismes des dévidoirs employés dans la filature - connus depuis longtemps. Dans les édifices des nomades ainsi que dans les installations temporaires on utilisait également une combinaison de pièces de compression et de tirants, voir les systèmes de haubannage des tentes, des jeux de manège des fêtes foraines, les grands chapiteaux de cirque. La roue de bicyclette est un autre archétype semblable qui n'a pas manqué d'inspirer les constructeurs voir les grandes roues ayant jusqu'à une centaine de mètres de diamètre, comme celle de l'Exposition Universelle de Paris, portant plusieurs dizaines de wagons, la charge d'un train entier.

Dans le bâtiment au sens strict, de remarquables structures appelées encore aujourd'hui fermes Polonceau, d'après leur inventeur, ont été employées en France depuis 1837 pour couvrir des halls de chemin de fer et autres espaces de grande portée. A peu près dans le même temps, des systèmes semblables étaient proposés par Robert Stephenson et Eugène Flachat. Ces structures composées de bielles et de tirants sont d'une étonnante légèreté bien qu'elles soient composées en plan donc sujettes à déversement, c'est à dire gauchissement. Cet inconvénient était reconnu par Viollet le Duc et en principe éliminé par l'utilisation de couples de bielles en "V" proposée en 1872 pour un projet non réalisé mais publié dans ses Entretiens et qui montre, en outre, un schéma général polyédrique et non planaire. Bien que les structures de Camille Polonceau et de Viollet le Duc soient encore sensibles au renversement des efforts qui entraînerait en effet leur dislocation, elles peuvent être considérées comme les ancêtres directs des structures autotendantes, étant construites de barres articulées à leurs extrémités et assujetties à une série de membrures de tension.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

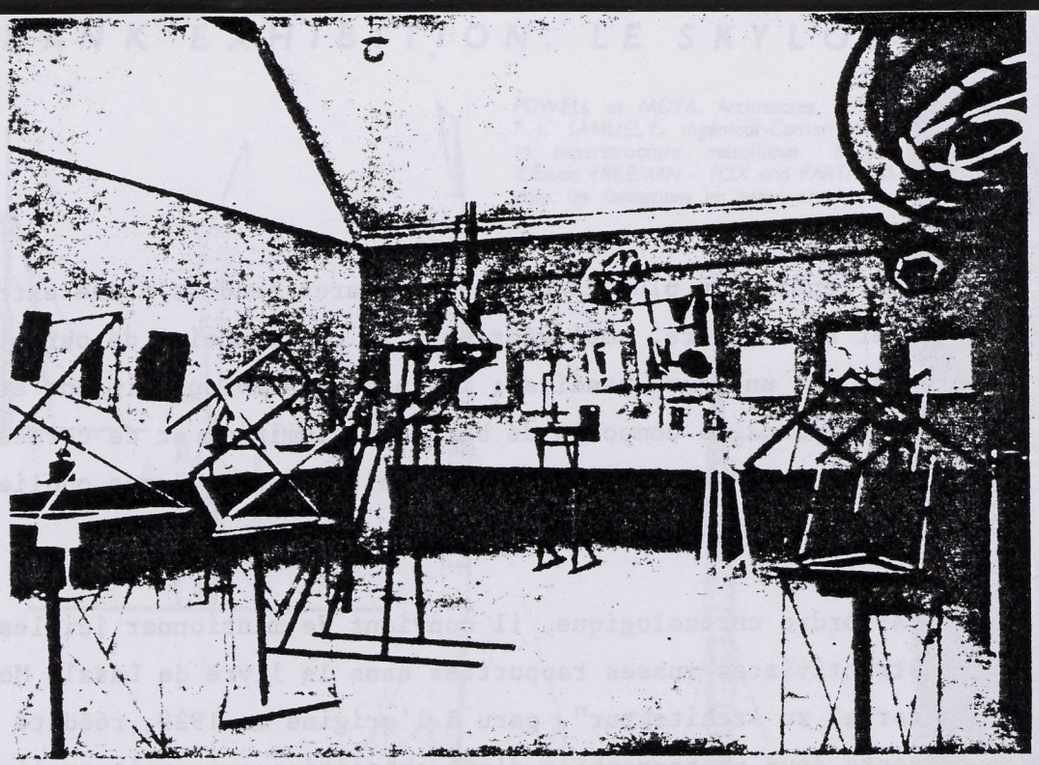


foto: buch neuer künstler

abb. 115 die ausstellung der russischen konstruktivisten in moskau 1921

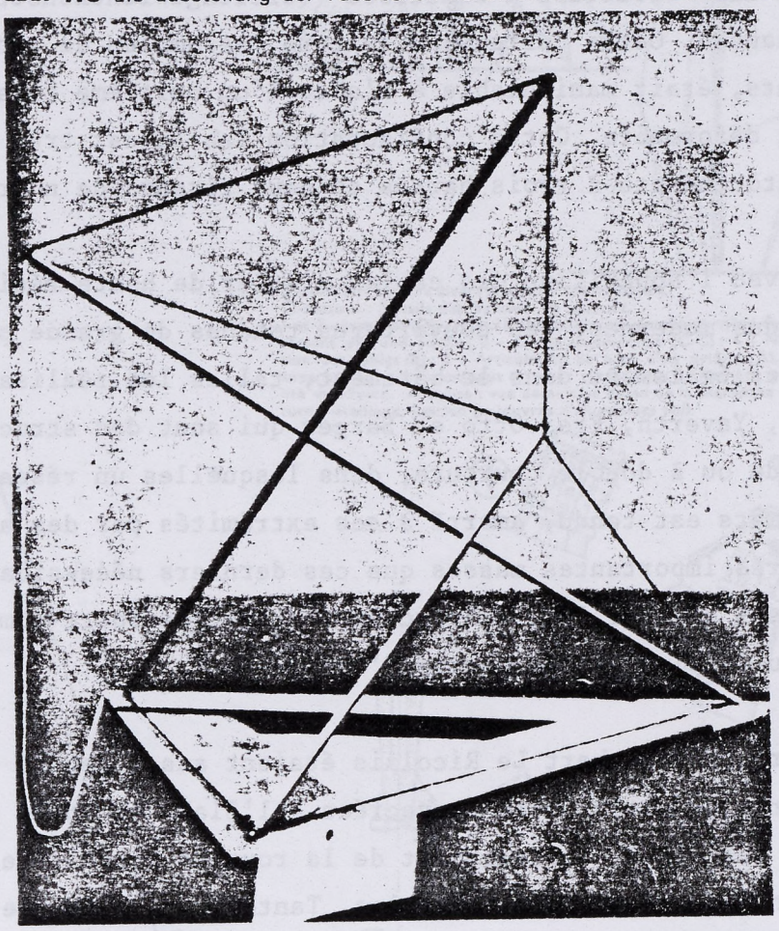


abb. 116 johansen, moskau 1921
gleichgewichtskonstruktion (zieht man an dem faden, gerät die plastik in eine andere, gleich wie die erste, ausbalancierte stellung).

die schulbegriffe der mechanik, dynamik, statik, kinetik, die probleme der stabilität, des gleichgewichts wurden durch die plastische form erörtert; die materialzusammenhänge, konstruktion, montage ausprobiert.
die konstruktivisten schwelgten in industrieformen. eine technische monomanie beherrschte sie. als übergangsstadium sicher gesund, da die dumpfen, verschimmelten anschauungen von „kunst" dadurch auch von einer anderen seite her einen neuen maßstab bekamen.

der heutige plastiker weiß kaum etwas von dem neuen aufgabenkreis des ingenieurs. komposition, goldener schnitt und ähnliches werden an akademien wohl gelehrt, aber nichts von statik, obwohl ihre kenntnis mehr als die ästetischen regeln zu einer ökonomischen arbeitsweise führen könnte. die konstruktivisten versuchten die fesseln zu sprengen. sie sagten, um von einem falschen etos, von einer übertriebenen verehrung verkalkter werte loszukommen: die kunst ist tot. es lebe das leben!

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

Une génération plus tard des structures tendues d'une extrême légèreté ont été, et sont encore, employées pour la construction de certains véhicules où le poids est un lourd handicap: les premiers avions biplans et monoplans avec leurs empennages composés de barres d'aluminium et de cordes de piano. Aujourd'hui les ULM et autres véhicules ultra légers, sans oublier les voiliers, sont bâtis sur ce principe.

Par ordre chronologique, il convient de mentionner ici les recherches des constructivistes russes rapportées dans le livre de Laszlo Moholy Nagy "Von Materiel zu Architektur", paru à l'origine en 1929, réédité en 1968, qui présente deux photographies d'une exposition qui avait eu lieu à Moscou en 1921 montrant une "structure d'équilibre" (Gleichgewichtkonstruktion) d'un certain Johansen. Cette curieuse structure, assemblée de trois barres et de sept tirants, était manipulable à l'aide d'un huitième tirant détendu, l'ensemble étant déformable. Cette configuration labile est très proche de la protoforme autotendante à trois barres et neuf tirants de notre invention.

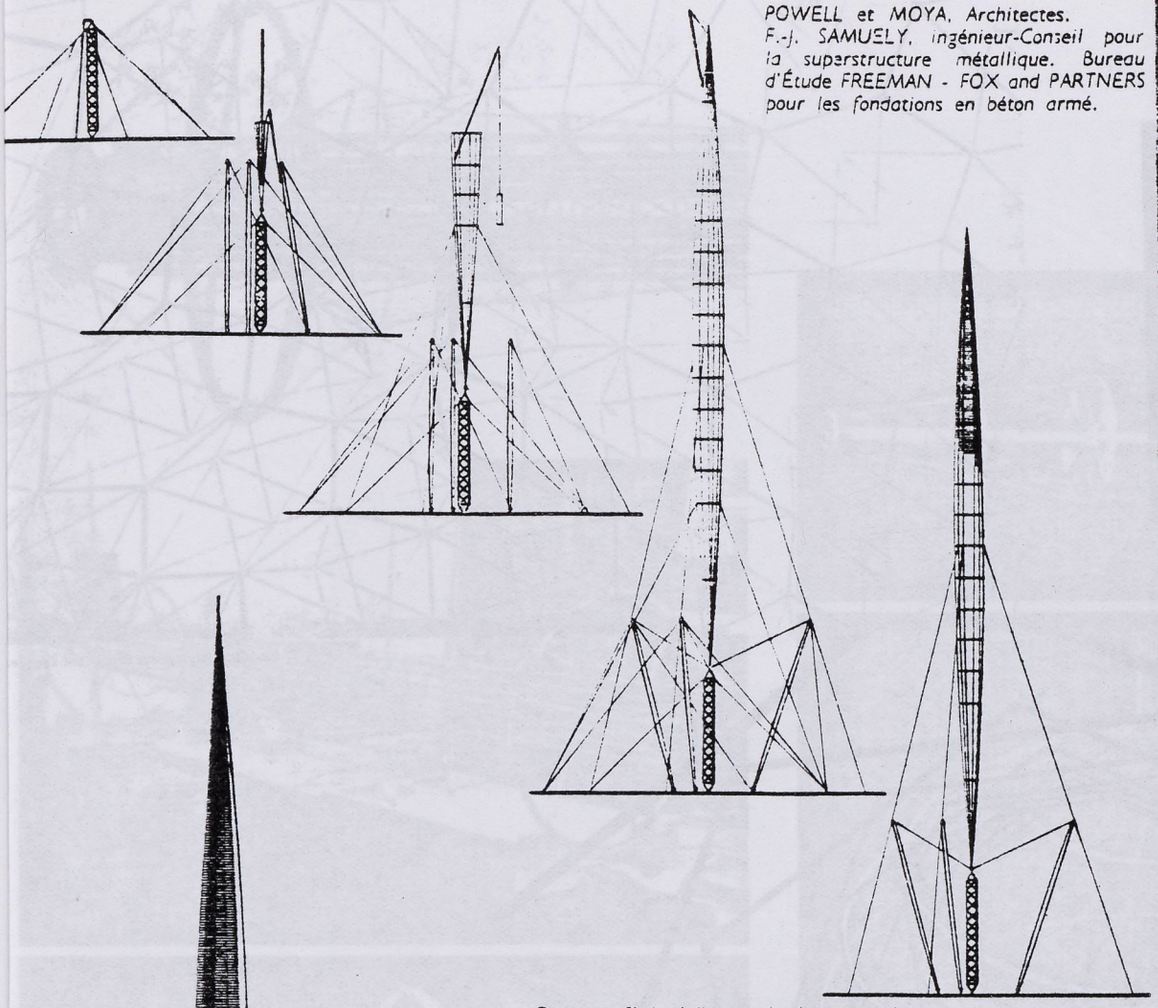
Depuis, avec l'apparition des cables d'acier de haute résistance et des ponts suspendus modernes, des couvertures tendues de grande portée sont devenues courantes également dans le bâtiment, telles les réalisations de Bernard Lafaille, Yaverth, Frei Otto et Sarger qui sont des structures-tentes, de forme caténoïde ou à double courbure, dans lesquelles un réseau de cables soutenu par des mâts est tendu, amarré à ses extrémités par des ancrages puissants. Les très importantes masses que ces derniers nécessitaient sont cachées dans le sol ou dans l'infrastructure,en quelque sorte comme est immergée sous l'eau la plus grande partie d'un iceberg.

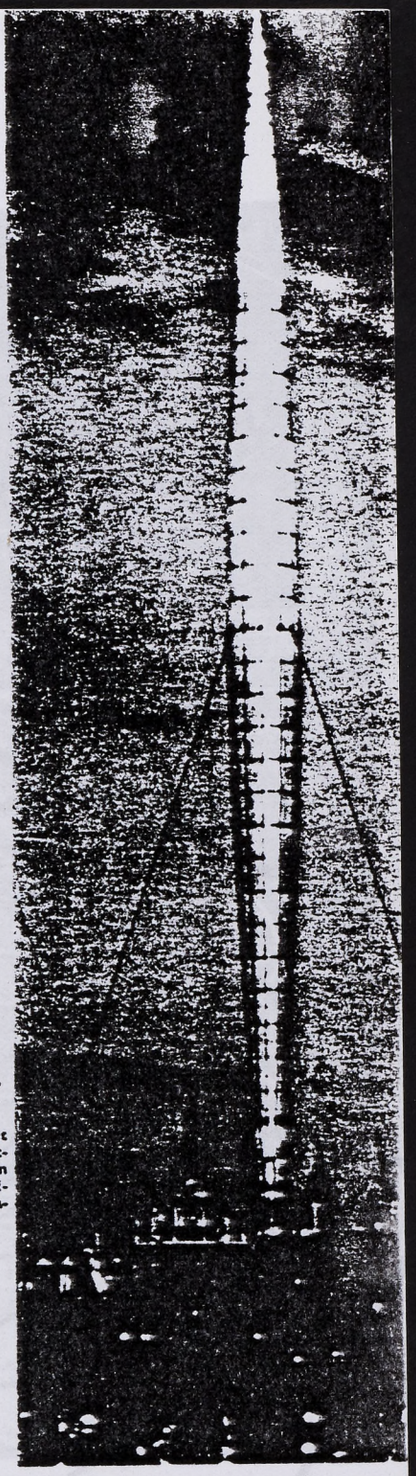
Les recherches de Robert Le Ricolais étaient aussi depuis son arrivée aux Etats-Unis presque entièrement consacrées à l'élaboration de structures tendues dérivées des fermes Polonceau et de la roue de bicyclette à laquelle il donnait des formes extrêmement variables. Tantôt les moyeux se multipliaient pour devenir la fameuse "lentille R.L.R.", tantôt les jantes s'étageaient en anneaux multiples autour d'un axe unique donnant des fuseaux enjambant des distances considérables. Le pavillon des Etats-Unis à l'Exposition Universelle de Bruxelles par Edward D.Stone et les autres ouvrages de Lew Zetlin sont également les dérivés de ces systèmes.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

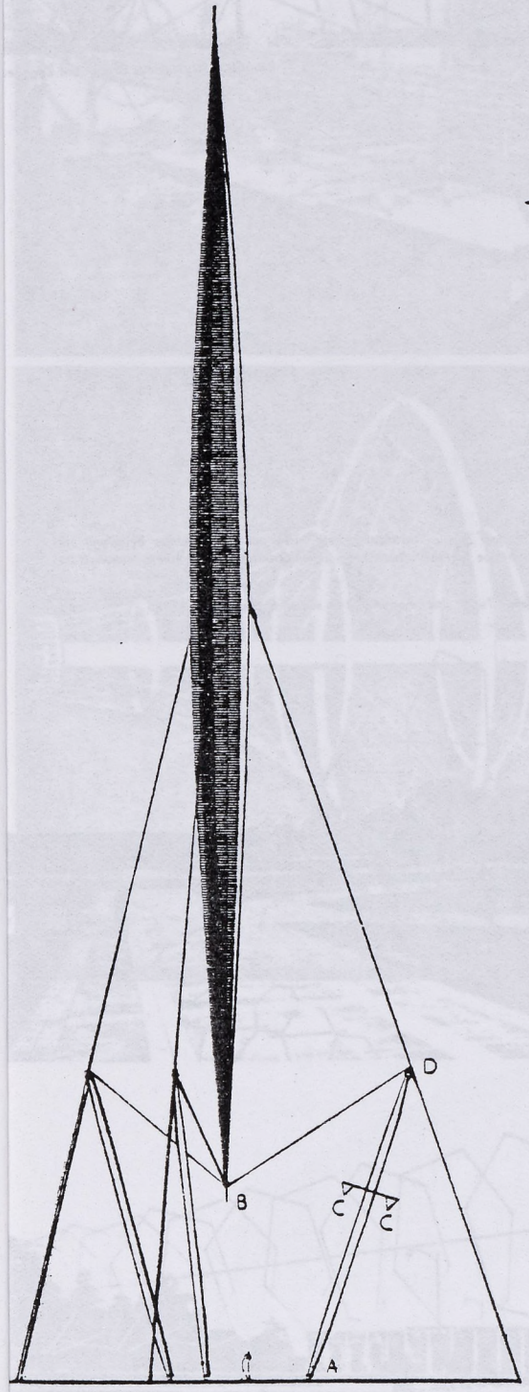
SOUTH BANK EXHIBITION. LE SKYLON

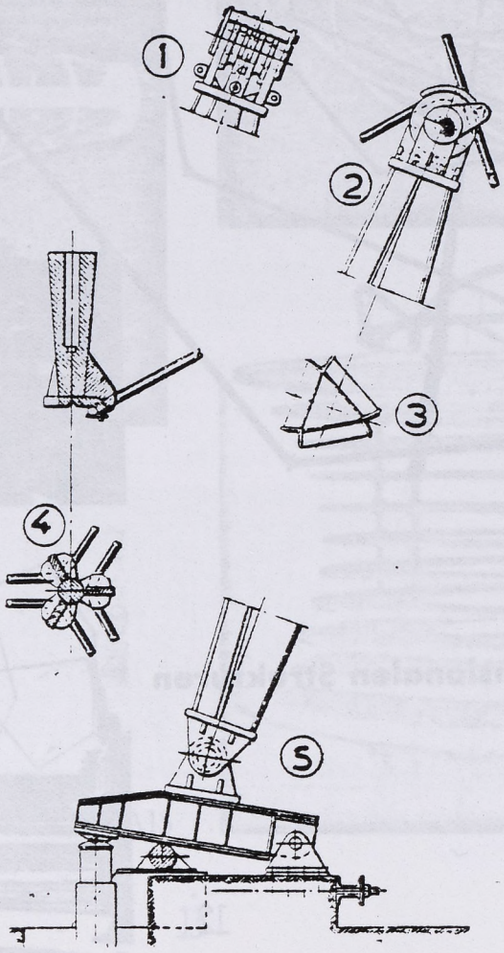
POWELL et MOYA, Architectes.
F.-J. SAMUELY, ingénieur-Conseil pour la superstructure métallique. Bureau d'Étude FREEMAN - FOX and PARTNERS pour les fondations en béton armé.

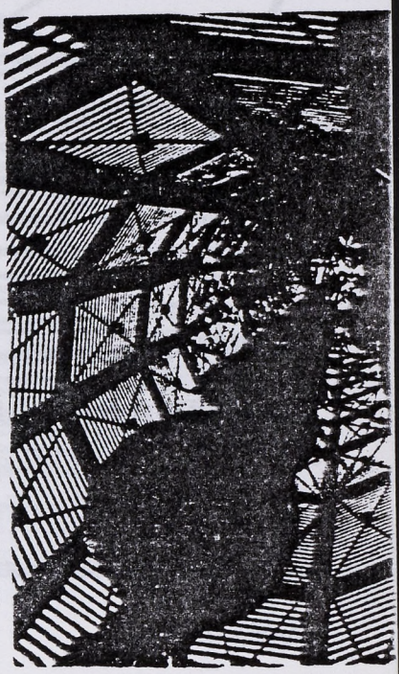




Dessins du Skylon à divers stades de construction.
Ci-dessous : Détails des pylônes de support.
1 et 2 - Sommet (D), trois câbles d'acier sont ancrés derrière chaque support et passent par une poulie ; 3 - Coupe transversale (C-C) ; 4 - Nœud d'intersection des câbles (B) ; 5 - Articulation de base d'un pylône (A), au moyen d'un appareil hydraulique on peut orienter ces pylônes de manière à assurer la stabilité du Skylon. A droite : vue de nuit et détail de la charpente intérieure, ossature métallique, finition en louvres d'aluminium poli.



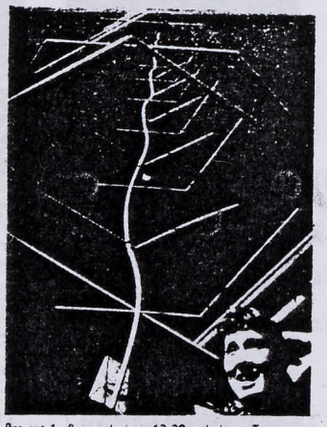




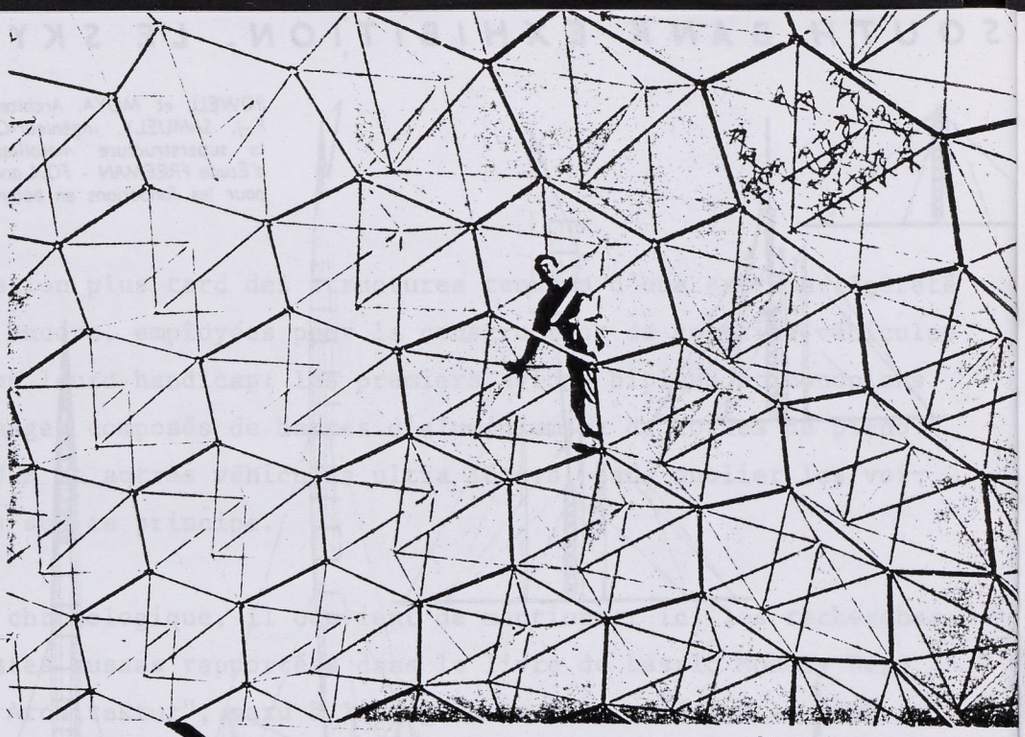
Cliché Ossature Métallique

Dimensions : hauteur totale : 91 m 50, diamètre maximum : 4 m 10. Distance entre les bases des pylônes de support : 21 m 35
Poids approximatif : 28 tonnes.

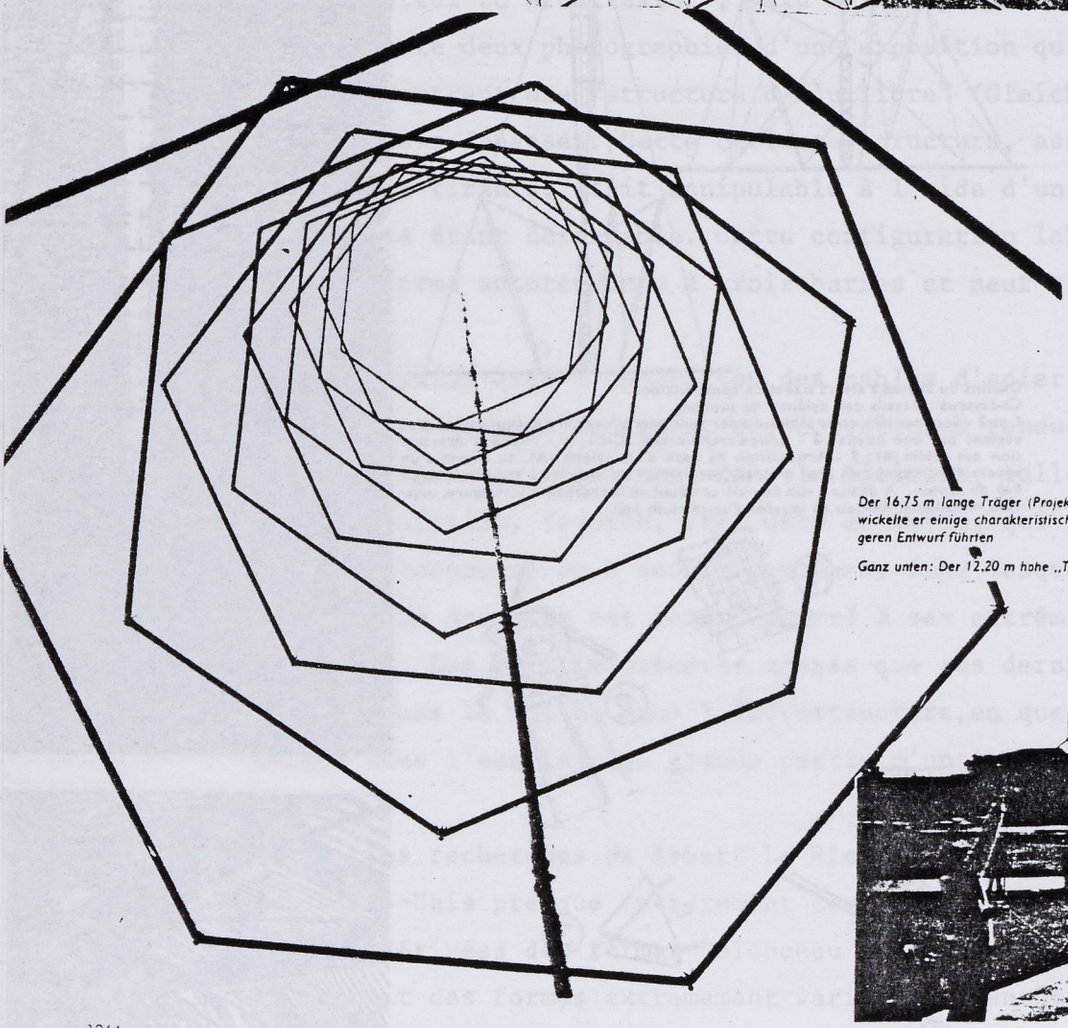
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE



Projekt 1. Beispiel eines 12,20 m hohen „Turmes" aus Holzstäben und leichtem Drahtseil. Klare Trennung der Zug- und Druckglieder. Das Bild auf Seite 1365 oben zeigt die Verbiegung der Druckglieder (Kein Brechen!)

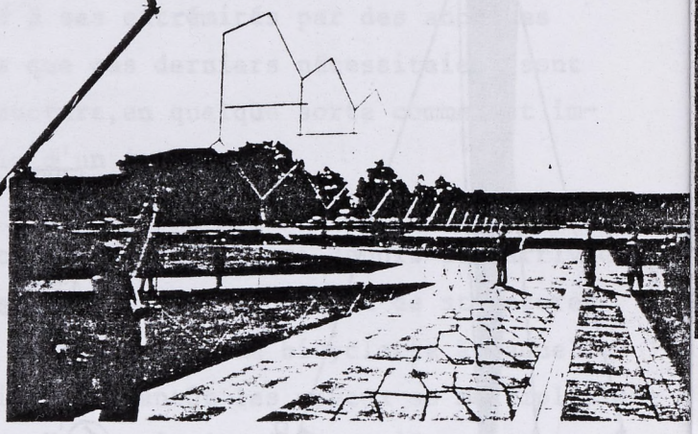


Räumliche Struktur aus Druck- und Zuggli



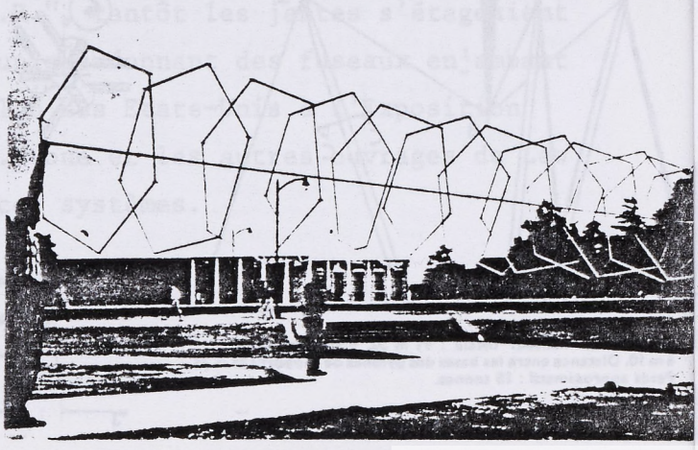
Der 16,75 m lange Träger (Projekt 2), hier hochkant gestellt, wiegt nur 25 kg. Unter Belastung entwickelte er einige charakteristische Eigenschaften einer solchen Struktur, die zu einem leistungsfähigeren Entwurf führten

Ganz unten: Der 12,20 m hohe „Turm", hier waagerecht an seinen Endpunkten gehalten



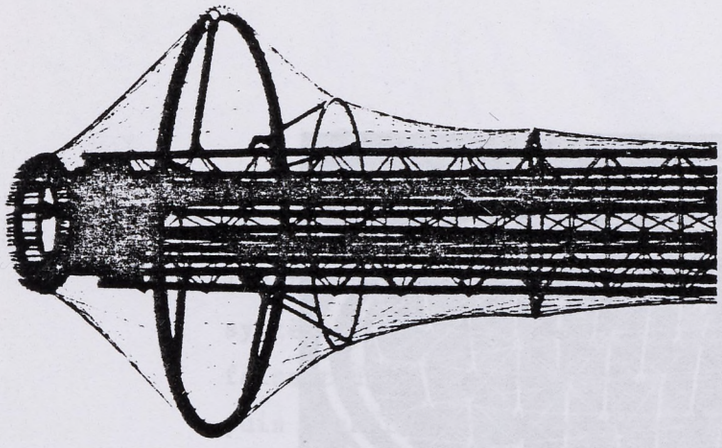
Jeffrey Lindsay, Los Angeles

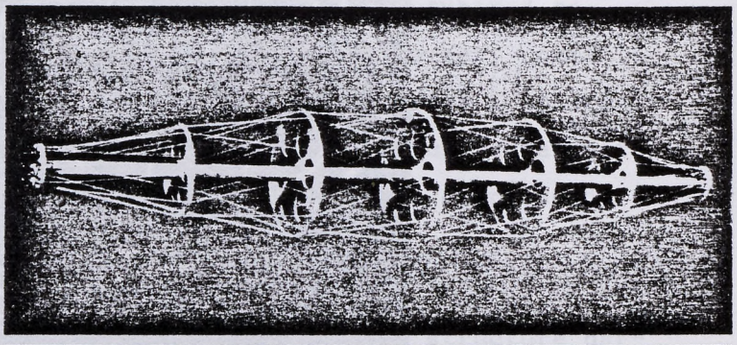
Versuche mit dreidimensionalen Strukturen

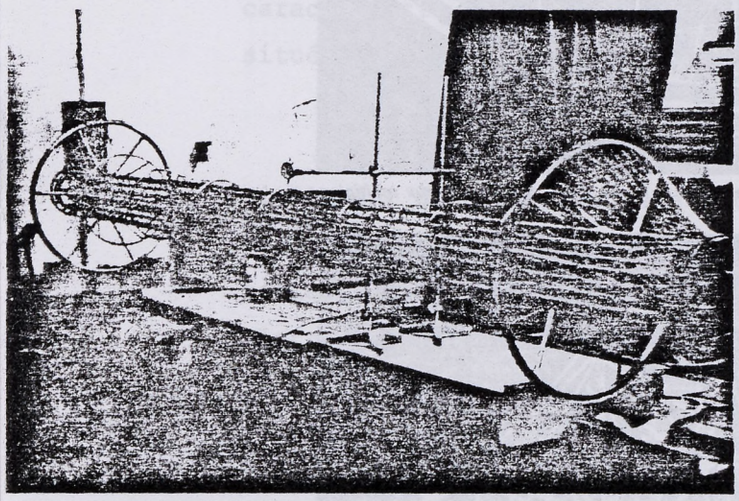


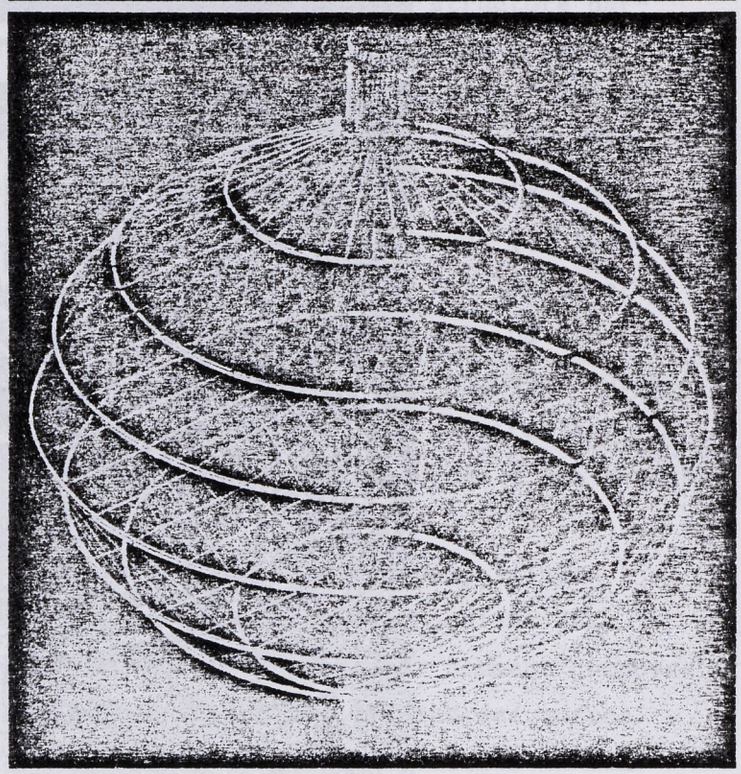
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

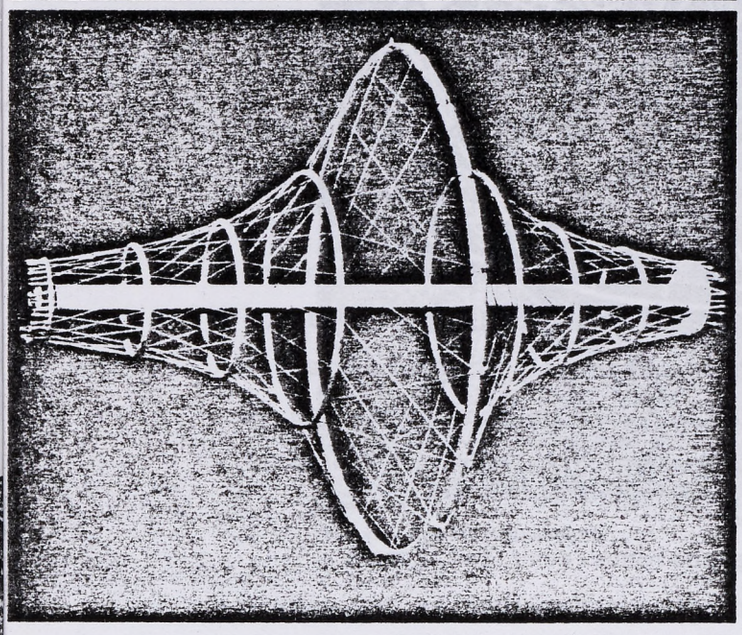
28
29
30

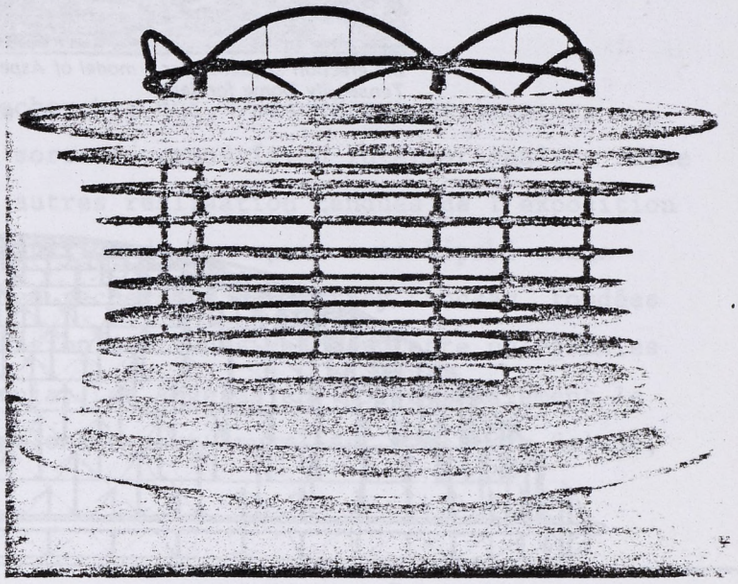








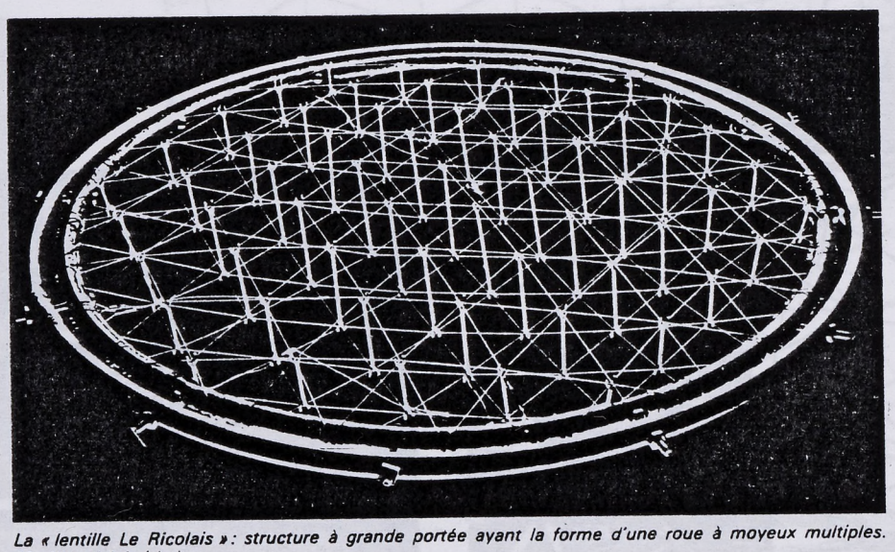




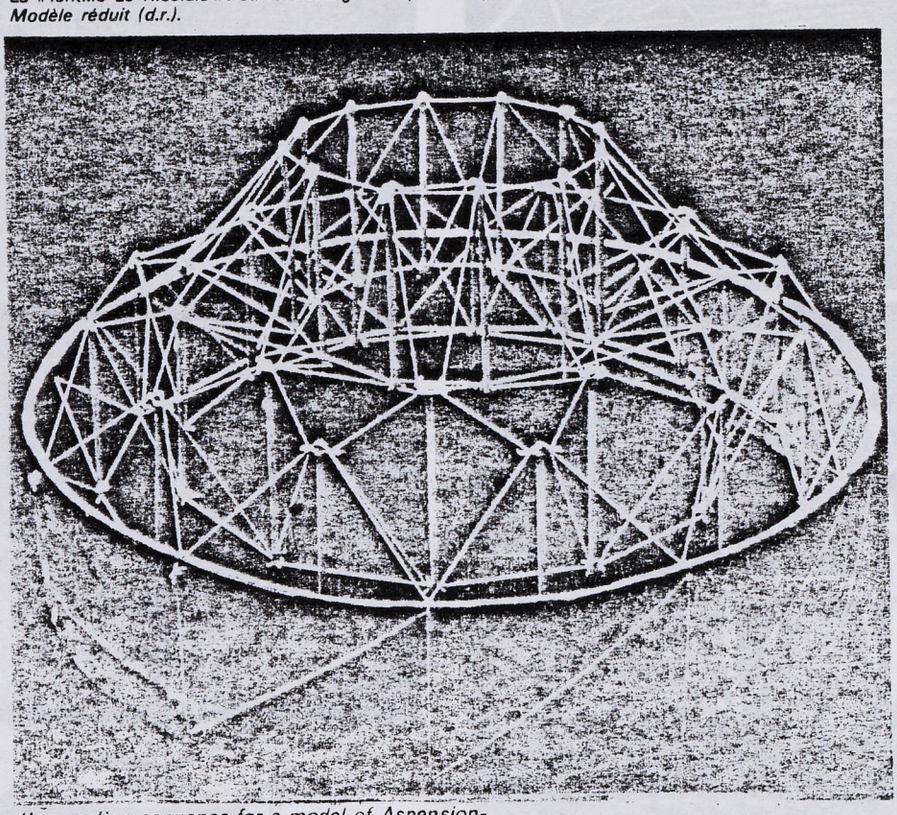
25
26
27

Robert LE RICOLAIS

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE



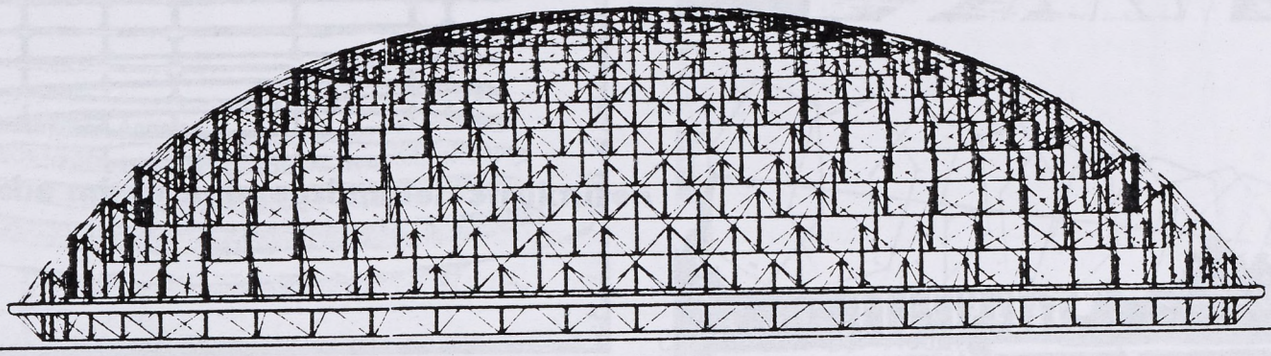
La « lentille Le Ricolais » : structure à grande portée ayant la forme d'une roue à moyeux multiples. Modèle réduit (d.r.).



the erection sequence for a model of Aspension-Tensegrity Dome for Japan

Architectural Design July 1961

R. B. Fuller



Gernot Minke

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Ce qui est fondamentalement original dans la roue de bicyclette et ses dérivés, c'est que deux ou plusieurs organes travaillant à la compression - moyeux et jantes - sont reliés par l'intermédiaire d'une série de tendeurs, les rayons. Quelle que soit la transformation que l'on fasse subir à ce système - en l'allongeant, l'applatissant ou en le faisant bomber, comme le faisait déjà John Hawkshaw en 1862 dans sa gare de Charing Cross à Londres, puis Buckminster Fuller dans son "aspension" structure - il lui reste cette caractéristique essentielle: la discontinuité des éléments de compression situés à l'intérieur d'un pourtour rigide.

L'application la plus spectaculaire de cette sorte de structure partiellement disconnectée a été toutefois le signal du Festival de Londres construit en 1950 par F.J. Samuelly, ingénieur, avec Rowel et Moya, architectes, où un "cigare" de 91,50m de hauteur et de 4m de diamètre semblait flotter, apparemment libéré de l'effet de la gravitation. Un exploit comparable a été réédité en 1958 par le signal de la "Porte des Nations", à l'entrée principale de l'Exposition Universelle de Bruxelles, dû à P. Guillensen et J.Konig, architectes, avec André Paduart, ingénieur constructeur, où trois éléments en forme de "V" semblaient défier la pesanteur. Ces deux structures, toutefois, n'étaient pas autoportantes étant amarrées au sol, celui-ci remplissant en quelque sorte le rôle de la jante solide périphérique d'une roue.

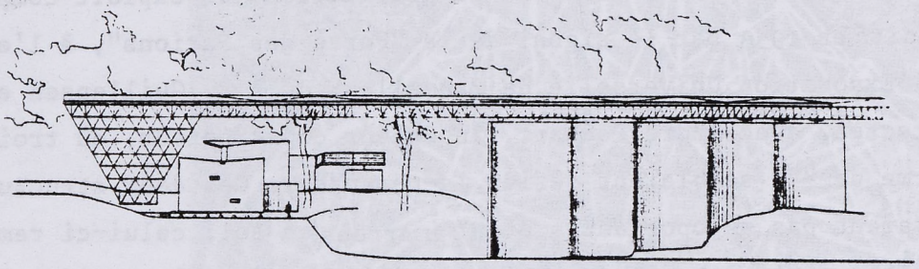
Il n'en reste pas moins que ces réalisations fascinantes, jointes à la vogue des constructions tendues de la fin des années 50, posaient aux constructeurs-chercheurs, tel un rebus irrésolu, le problème: comment composer des structures où les éléments durs soient disconnectés les uns des autres et également indépendants de tout ancrage au sol, donc autoportants au même titre que la roue de bicyclette?

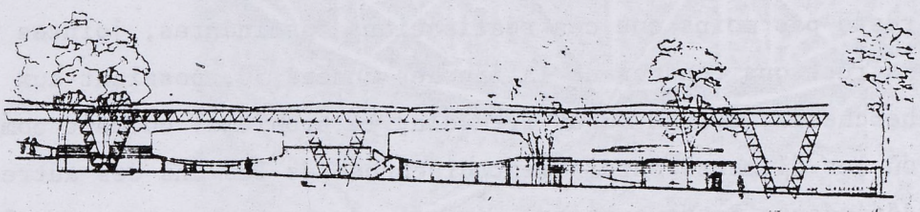
Parmi les très nombreuses recherches qui, vues rétrospectivement, semblaient se déclancher comme une sorte de compétition internationale - suite à l'impulsion donnée aussi par les autres réalisation tendues de l'exposition de Bruxelles, voir le remarquable pavillon du Transport avec Lipski comme ingénieur - on doit citer d'abord les recherches de Jeffrey Lindsay, fondées sur la juxtaposition et la superposition des roues de bicyclette polygonales réalisées à l'University of California, Los Angeles en 1957 et également le projet , non réalisé, du pavillon polonais pour Bruxelles, par Jerzy Soltan,

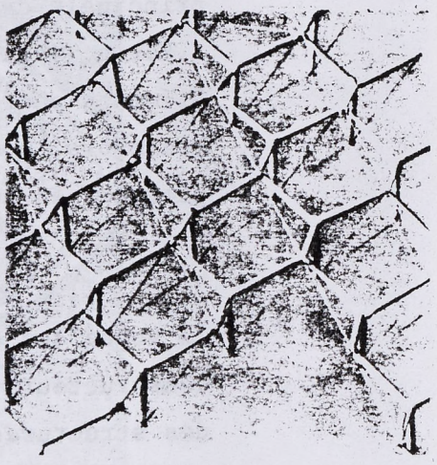
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

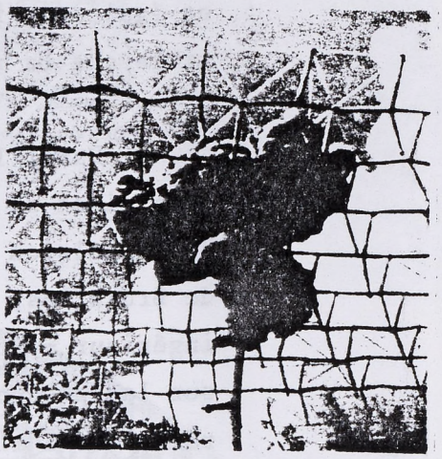
Der polnische Ausstellungspavillon für die Weltausstellung Brüssel 1958

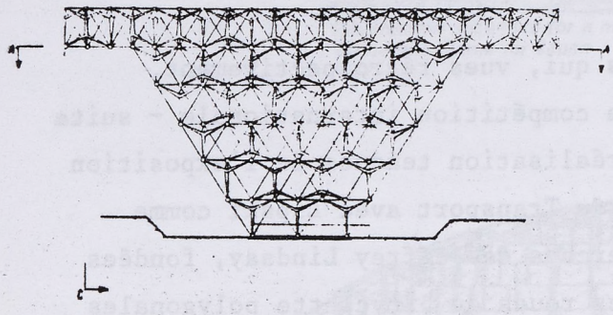
T. Babicz, W. Fangor, Z. Ihnatowicz,
S. Soltan, L. Tomaszewski,

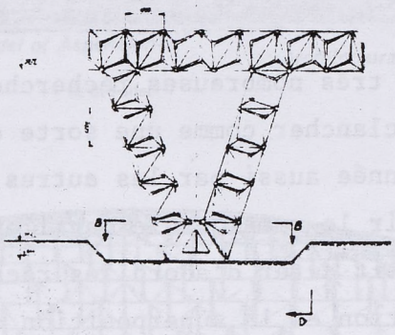


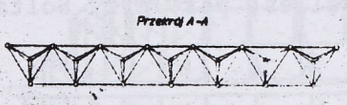












Polnischer Ausstellungspavillon für die Weltausstellung Brüssel 1958. Grundriß, West- und Nordansicht, Maßstab 1:800. Der Grundriß zeigt die drei Konstruktionsstützen, die Schirme, das Brückchen, den großen gewellten Schirm im Süden und die dreieckigen Löcher für die Bäume. Die Nordansicht zeigt die drei Kinos. Unten: Konstruktionseinzelheiten der Stützen und des Daches. Die Teile werden vorfabriziert. Konstruktionsblatt 1:250

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

Lech Tomaszewsky et Oscar Hansen où apparait,pour la première fois, comme sous-ensemble d'un réseau tridimensionnel le quadripode tétraédrique - l'étoile à quatre branches - tendant une pyramide souple de forme tétraédrique. Ce même volume tendu est repris par R.Buckminster Fuller, en 1959, pour construire son premier mât dit de "Tensegrity" composé, toutefois, de quadripodes dissociés en deux "V" semblables à ceux du portique d'entrée de l'exposition de Bruxelles. Peu après, en 1961, il transposait ces principes en réalisant une coupole géodésique, mais, qui composée en une simple couche, n'évitait pas le contact latéral entre les barres. A la même époque, outre l'icosaèdre, quelques "equilibriums" primitifs étaient publiés par ses élèves ou des chercheurs gravitant autour de lui, tandis que l'espagnol Pinero présentait son dôme mobile assemblé de tripodes pliants.

Une mention particulière doit être accordée aux recherches originales de l'américain Kenneth Snelson qui réalisait en 1959 une sorte d'empilement irrégulier puis dès 1963 un mât-signal à construire au Pakistan, et diverses autres combinaisons dans lesquelles les barres de compression étaient réellement isolées, qui ont été exposées dans des galeries d'art plastique et en 1969 dans une exposition de plein air à New-York.

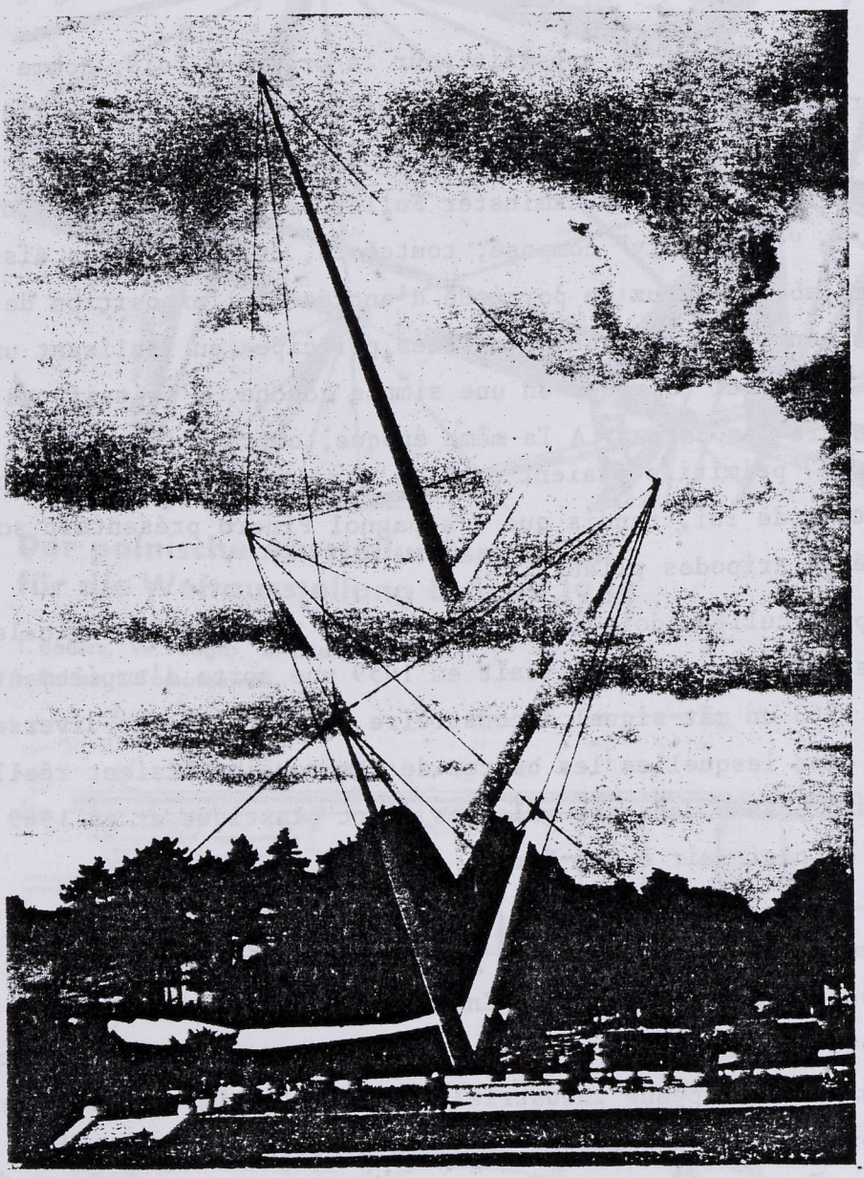
Pendant ce temps, en France, suite à nos contacts développés dès sa création,en 1962, avec le Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM), le soutien obtenu par cet organisme nous a permis de prendre des brevets dans les pays européens industrialisés les plus importants. Après la signature d'un contrat de coopération, le CTICM déclara son "intention de procéder à des essais relatifs à ces inventions... afin de promouvoir la mise au point, l'application et le développement de ces recherches intéressant l'architecture". De mon côté je m'étais engagé "à communiquer sous la garantie du secret professionnel, toutes données nécessaires à la compréhension des brevets et à la réalisation des essais".

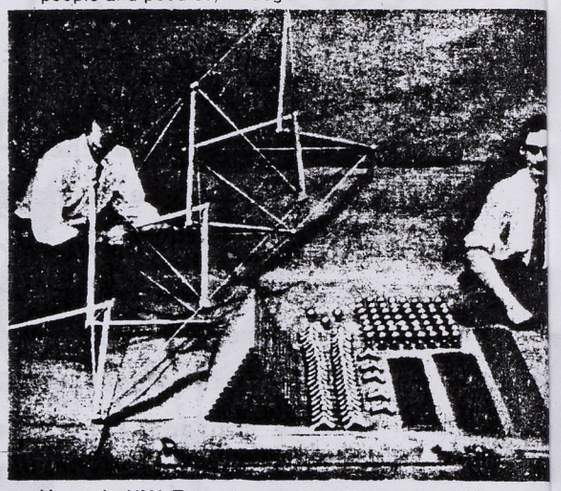
En ce qui concerne la matière même de ces essais, pendant les années précédentes j'avais élaboré des douzaines de combinaisons autotendantes qui étaient exposées à la Maison des Beaux-Arts en 1962: outre les solides primitifs élémentaires, les antiprismatiques et leur juxtaposition et interpénétration pour la construction de pièces oblongues; puis leur juxtaposition en réseau double couche, plan ou courbe; enfin les empilements cristallins et les hyperpolyèdres. Ces compositions permettaient dès lors la construction

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

bruxelles 58

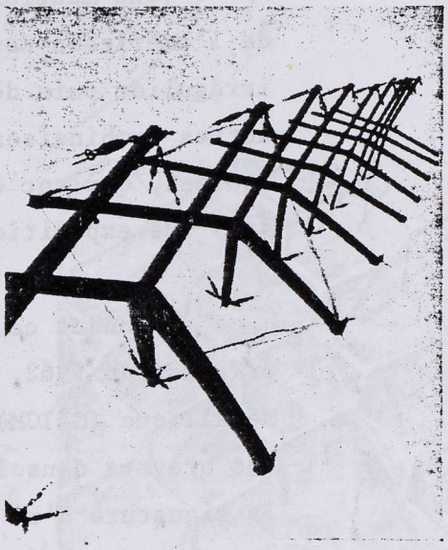
The Buckminster Fuller Tensegrity Mast for the 1959 exhibition in the garden of the Museum of Modern Art was constructed by Price in his own workrooms, then guided through the window and delivered by hand (to the curiosity of people and poodles) through the New York streets.



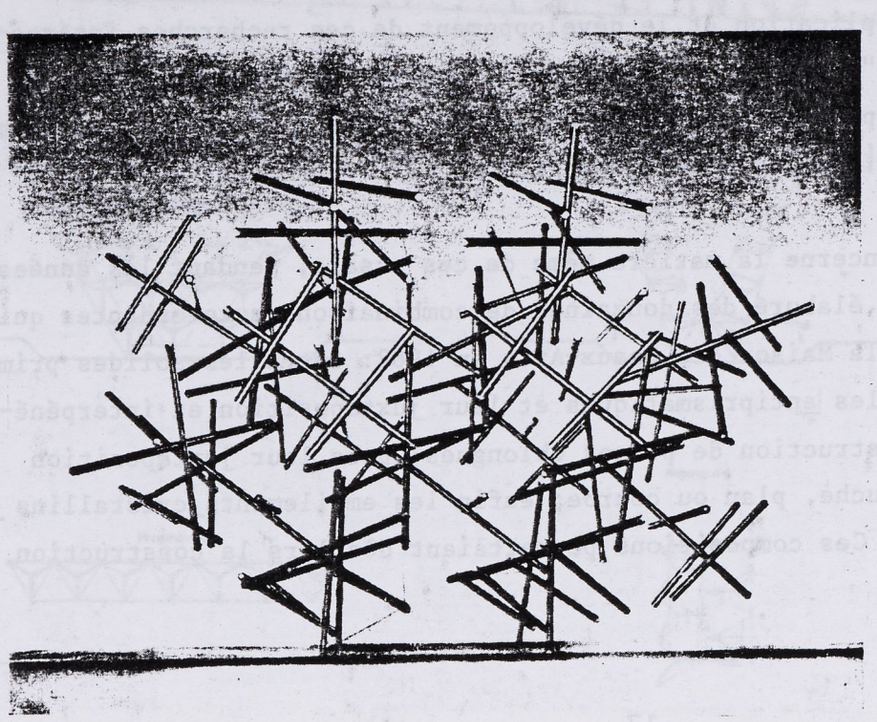


Above: the MMA Tensegrity mast kit 1959. At left is Shoji Sadao and (right) Edison Price who are co-designers. The tension members are $\frac{1}{16}$in. monel rods, compression members 1in. aluminium tube

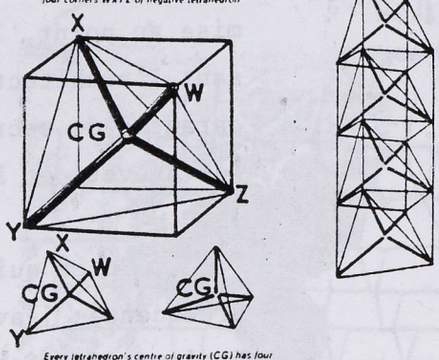
Below: early version of tensegrity mast 1948



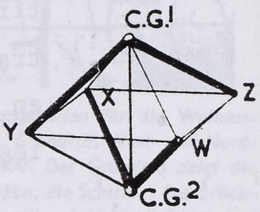
Below: a Tensegrity structure, designed by Kenneth Snelson, 1959, shown at the MMA



We put a steel sphere at CG of cube which is also CG of tetrahedron and run steel tubes from CG to four corners W X Y Z of negative tetrahedron

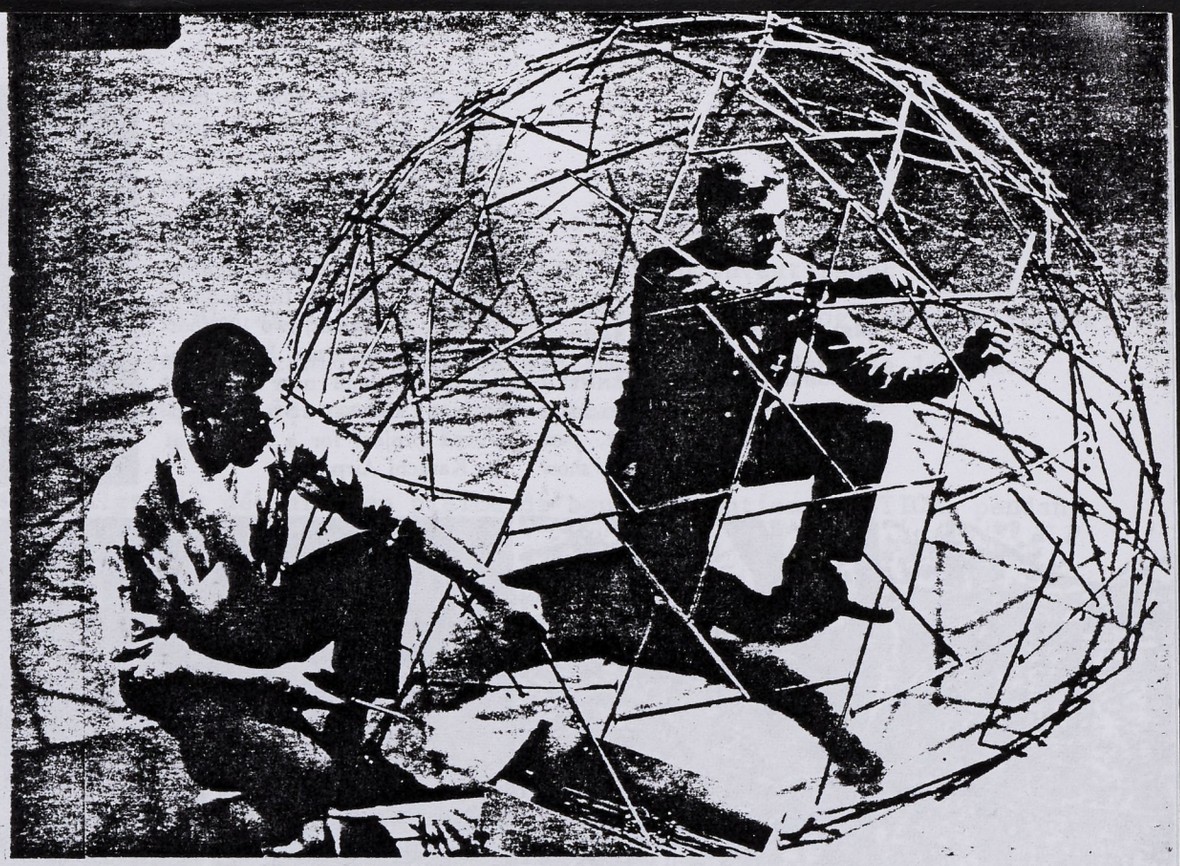


Every tetrahedron's centre of gravity (CG) has four radials from the CG to the four corners of the tetrahedron



The junction between two tetrahedra. The system is non-redundant, a basic discontinuous-compression, continuous-tension or 'tensegrity' structure
Ball joints CG1 and CG2 are pulled toward one another by vertical tension stay, thus thrusting universally jointed legs outwardly. Their outward thrust being stably restrained by finite sling closure Y X Z W

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE



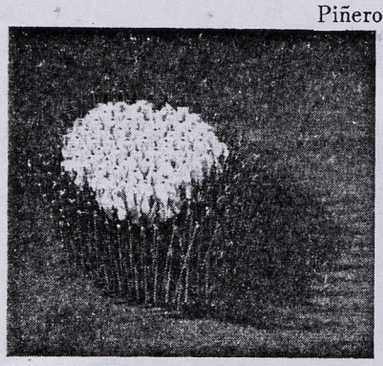
Buckminster Fuller

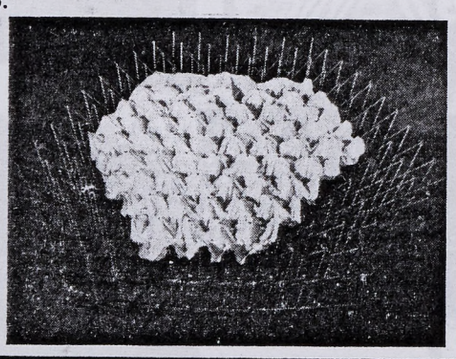
8ft. tensegrity sphere, half assembled, showing its adaptability as environment control structure. Southern Illinois University

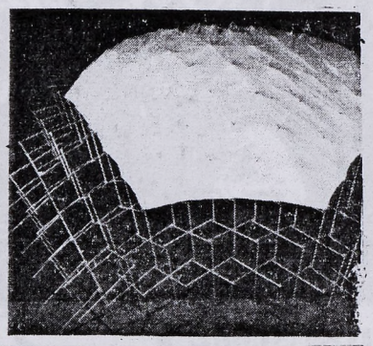
Architectural Design July 1961

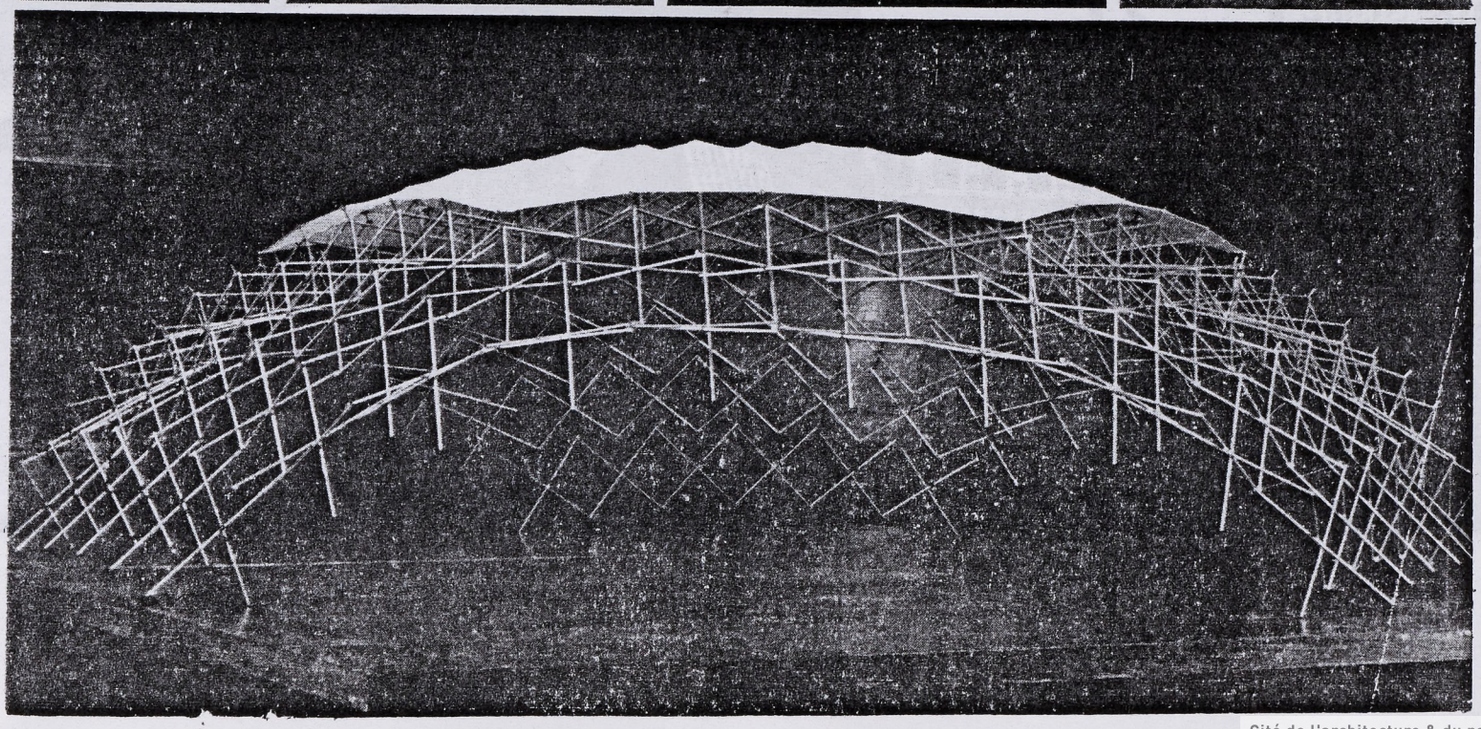
A major attraction at the recent UIA student exhibition was a space-framing system that unfolds to 100-ft diameter from a bundle of bars only 10 ft in length and 6 ft in diameter. Working model of the "Spatial Reticular Structure" is shown on these pages with the young Spanish designer, Emilio Perez Piñero.

The structure is composed of rigid bars and flexible wire cables, the bars working in compression and the cables in tension. Bars are joined to form an accordion-like framework that is capable of being folded or unfolded in every direction.





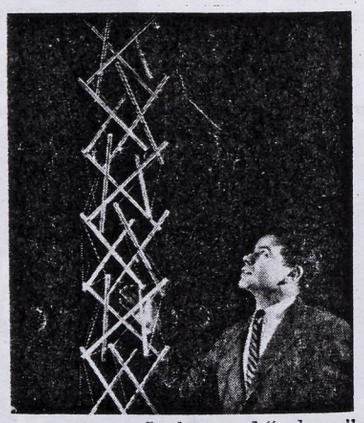




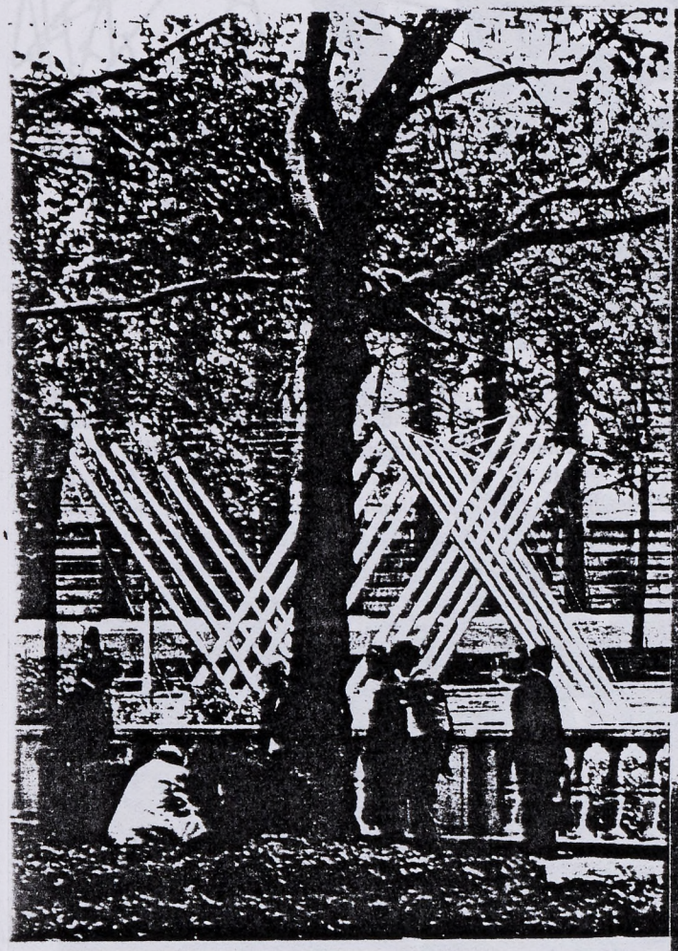
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

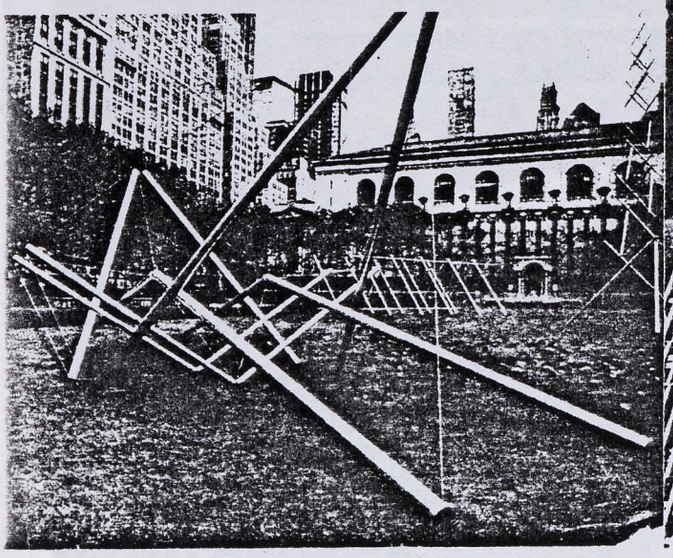
SNELSON STRUCTURES SHOW

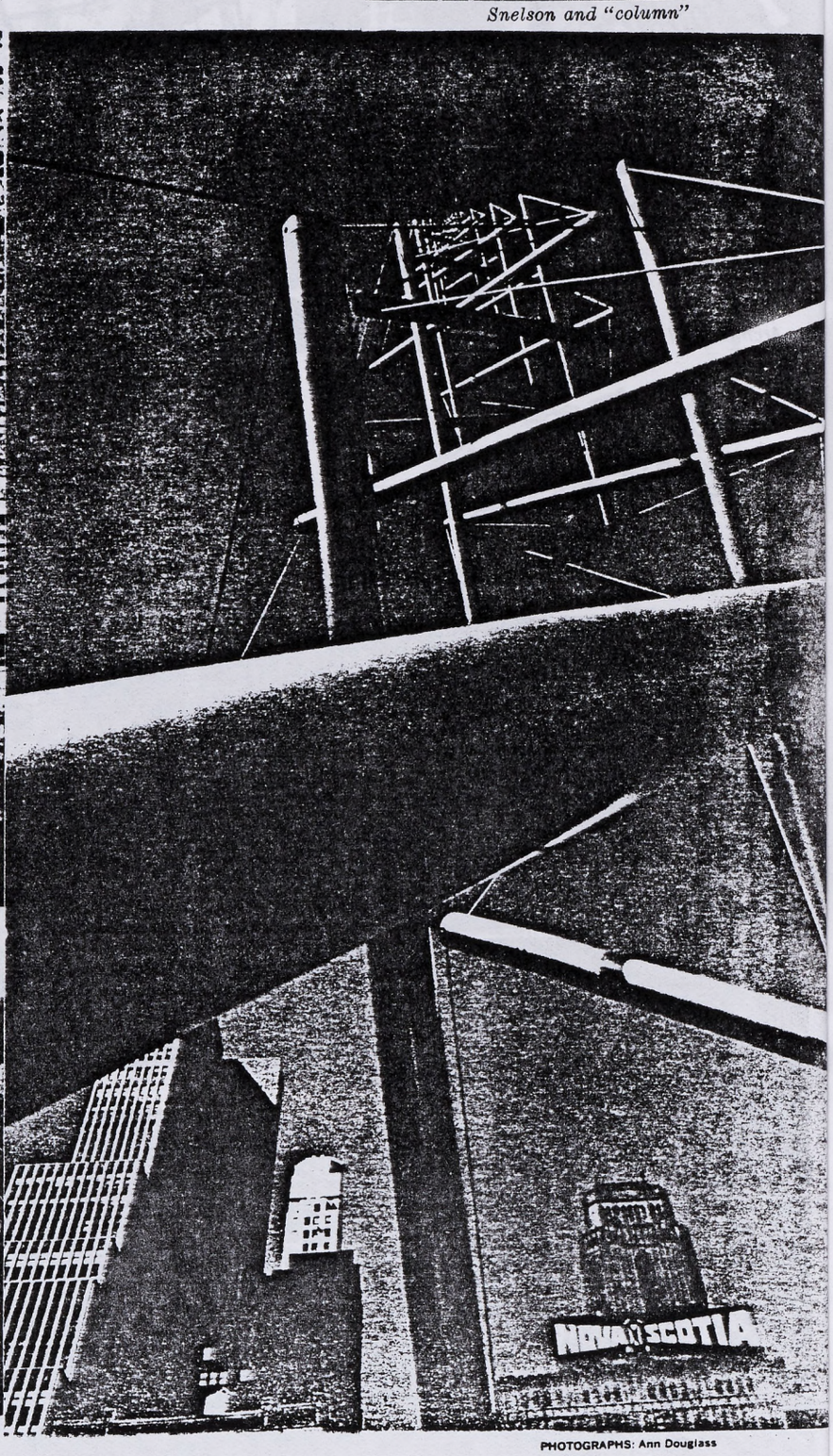
Structural Designer KENNETH SNELSON, whose intricate space frames are part sculpture, part complex engineering, will show some of his latest work at Pratt Institute in Brooklyn, N.Y., from March 4-15. These structures, which lock the wire and tube components in a careful balance between tensile and compressive forces, attracted the attention of officials of Pakistan International Airlines. At present, two 100-foot-high "columns" are being considered to stand near Architect EDWARD DURELL STONE's approved project for a mosque at the Karachi Airport.



Snelson and "column"







PHOTOGRAPHS: Ann Douglass

PUSH AND PULL IN THE PARK

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

de mâts, tours, ponts, voûtes, coupoles et ossatures: pratiquement tous les organes composant un bâtiment ou toute installation investissant l'espace. Cette masse de travail aurait été capable d'alimenter en programmes de recherche un laboratoire de mécanique structurale important pendant de longues années. Si toutefois un laboratoire de ce genre avait existé.

Or, malgré la déclaration pleine de bonne intention du CTICM, pendant toute la durée de notre coopération, un seul essai et encore très partiel a été entrepris. Il était effectué à grands frais dans le laboratoire de résistance des matériaux de la Fédération Nationale du Bâtiment, Rue Brancion, par des ingénieurs d'emblée hostiles ou incapables de comprendre le sens et l'importance de ces recherches: le but étant non pas d'éprouver la résistance des matériaux employés, d'ailleurs largement connue, mais la résistance des formes statiques nouvelles.

Cette incompréhension congénitale était due, une fois de plus, à la dichotomie totale qui règne en France en matière de formation des deux parties prenantes de l'art de construire: d'un côté les architectes dépourvus des connaissances leur permettant de concevoir des techniques nouvelles, et de l'autre côté des ingénieurs dressés seulement à dimensionner les ouvrages conventionnels que les architectes leur soumettent. Ma formation professionnelle d'architecte-ingénieur, qui est également celle de tous mes collègues issus des universités techniques d'Europe Centrale et des instituts technologiques de type anglo-saxon, m'a dicté tout naturellement une façon de penser qui paraissait étrange aux uns comme aux autres. Ceci les a amené sinon à un refus de collaboration, mais à rejeter d'emblée et par a priori les structures autotendantes ou plus exactement leur validité en tant qu'ossatures porteuses à l'échelle du bâtiment et capables de supporter des charges utiles.

C'était essentiellement la non conformité du dénombrement des barres par rapport au nombre des joints d'assemblage, qui ne correspondait pas à la formule en usage pour définir l'indéformabilité des charpentes triangulées, ces arrangements n'étant pas triangulés, qui fournissait argument pour nier leur stabilité. Ceci malgré les nombreuses maquettes métalliques présentées à une échelle réduite et parfaitement et tangiblement indéformables. Les mêmes avatars nous attendaient en matière de calcul des efforts quand, toutefois, malgré ses apparentes anomalies on a bien voulu accepter de tenter

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

d'appliquer l'un ou l'autre des programmes existants pour calculer les contraintes internes provoquées sous une charge quelconque. Ces calculs fondés sur les programmes linéaires inadéquats ont, en effet, abouti à des résultats aberrants, prédisant généralement la ruine du système sous l'effet d'une sollicitation même insignifiante.

Si la majorité des interlocuteurs restaient sceptiques, l'existence de compositions semblables étaient cependant connues par les spécialistes des sciences mécaniques les plus avertis et classées comme systèmes treillis appelés "critiques ou surcritiques" ou "instantaneously rigid" dans la littérature anglo-saxone, qu'évidemment il convenait de les éviter dans la pratique - du moins selon les avis de la plupart d'entre eux.

Parmi les rares scientifiques intrigués par les nouvelles possibilités constructives de ces systèmes inorthodoxes et rebelles aux analyses linéaires classiques, il faut citer Jean Tardiveau et Raymond Siestrunk, qui, par la suite, en 1975, ont présenté, proposée par Maurice Roy, une importante note sur ce sujet à la Section Mécanique de l'Académie des Sciences de Paris, ayant pour titre "Efforts et déformations dans les assemblages en treillis critiques et surcritiques en élasticité linéaire" que nous reproduisons en annexe. Cette communication a ouvert la voie à toute une série de thèses universitaires sur ce sujet, dont une des dernières, soutenue à Montpellier, consacrée une fois de plus à notre tripode antiprismatique, a valu à son auteur le grade de Docteur d'Etat.

Quoiqu'il en soit, entre temps et contrairement à ce qui était prévu lors de sa fondation, le CITCM était amené à renoncer à la création de son propre laboratoire de recherche structurale, tout en décidant de la favoriser au sein de la Section d'Architecture de l'Ecole Nationale Supérieure des Beaux-Arts, ENSBA, dans le cadre d'un grand mouvement de réforme, alors imminent, et qui visait surtout le réetoffement de l'enseignement technique et plus particulièrement la recherche dans le domaine de la construction. Ceci uniquement pour donner le change et ne pas rester à la remorque d'institutions semblables crées à cette époque par Z.S.Makowsky à Surrey University, Angleterre; par Frei Otto à l'université de Stuttgart; à l'université de Milan, à la London Polytechnic et dans toutes les bonnes universités des Etats-Unis - Michigan, North Carolina, Pensylvania, par exemple, qui sont effectivement

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

devenus des foyers d'une sorte de "high tech" architecturale avec les résultats que l'on connaît. Ce n'est, en effet, pas sans raison que les réalisations les plus remarquables en France sont depuis un certain temps conçues ou calculées par des représentants de ces écoles et de ceux qui en sont issus.

Vers 1964, cependant, notre convention de collaboration à été dénoncée sur l'initiative du CITCM, malgré l'avis très favorable de Robert Le Ricolais, alors à la tête du laboratoire de l'Université de Pensylvania, Philadelphie, avec qui un contact parrallèle était établi. C'est sous sa direction et avec l'appui de Jean Fayeton, Directeur des Etudes à l'ENSBA qu'un Atelier de Recherches Structurales devait être créé dès l'automne 64. De toute évidence, outre les réseaux tridimensionnels, le domaine privilégié devait être les structures métalliques précontraintes, chères à Le Ricolais,et en ce qui me concerne:les formes autotendantes. Il serait vain de revenir ici sur les raisons et les déraisons qui ont fait échouer ce projet dont les péripéties ont déjà été résumées dans le dossier récemment publié par l'U.P.6 sous le titre "Histoire de l'ARS - Le Ricolais".

Pendant ces quelques années,je n'ai pas cessé d'intervenir dans ce sens au sein de cette école en animant d'abord un groupe "hors concours" avec la participation des élèves intéressés par les recherches structurales et recrutés dans les divers ateliers de l'ENSBA. Avec ces groupes toujours mouvants et se renouvelant sans cesse,opérant dans des cadres et sous des prétextes les plus improvisés, il a été possible de réaliser des structures autotendantes parfois à assez grande échelle et d'attester, sinon de tester, leur stabilité. Ceci, évidemment, à défaut d'un laboratoire véritable permettant leur expérimentation dans les conditions normales habituelles d'une recherche scientifique.

L'anomalie, propre à cette activité marginalisée par le programme officiel, était précisément la rotation rapide d'un grand nombre de participants bénévoles de toutes nationalités, de qui on ne pouvait guère attendre une grande discrétion, pourtant souhaitable en matière de recherche scientifique afin de sauvegarder au moins le droit intellectuel des chercheurs sur les résultats. Mais, dans la situation donnée où dominait la routine, malgré ces risques et des préjudices effectivement subis, il ne restait que le choix entre l'étouffement ou la divulgation.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

ANPASSUNGSFÄHIGE ARCHITEKTUR

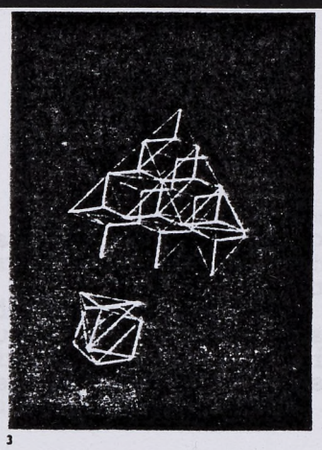
Alle hier gezeigten Studien, so gegensätzlich sie auch erscheinen mögen, sind Anwendungsbeispiele für das gleiche Prinzip. Immer geht es darum, die gebaute Starrheit unserer Städte aufzulockern, gleichzeitig aber die Stadt als menschlichen Lebensraum zu intensivieren, beides mit Hilfe neuer Techniken für das Bauen.

Es ist aber unzureichend, nur theoretische Überlegungen anzustellen, ohne ergänzende praktische Versuchsarbeit für die Herstellung von Elementen, für die physikalische und chemische Überprüfung neuer Konstruktionen und für Versuche der Variabilität.

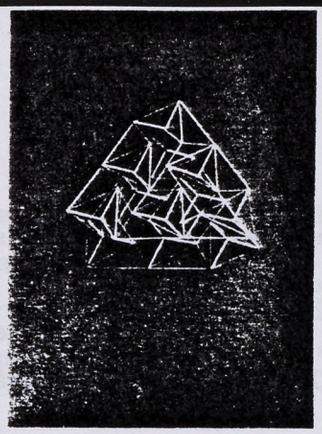
Schließlich muß untersucht werden, wie diese neuen Baumethoden und Konstruktionen das wirtschaftliche und gesellschaftliche Leben beeinflussen.

Solche Versuche und ergänzende Forschung übersteigen die finanziellen Kräfte des einzelnen oder privater Gruppen. Nur die Regierungen haben Budgets, dies zu ermöglichen. Wir rufen die Regierungen auf, Mittel für Forschung und Erprobung bereitzustellen.

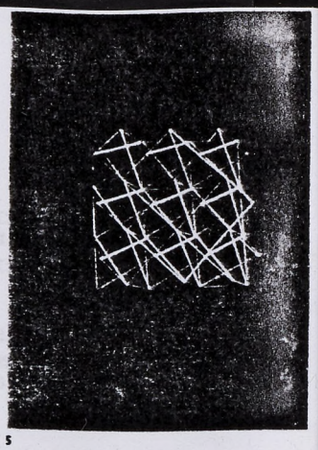
Diese Publikation verfolgt darüber hinaus den Zweck, den Architekten und Bewohnern zu zeigen – jeder Mensch ist ein Bewohner –, daß es in allen Ländern Sucher gibt. Es liegt gleichermaßen im Interesse der Fachleute wie der Bewohner, sich zu dieser Suche zusammenzuschließen und sie voranzutreiben.



3

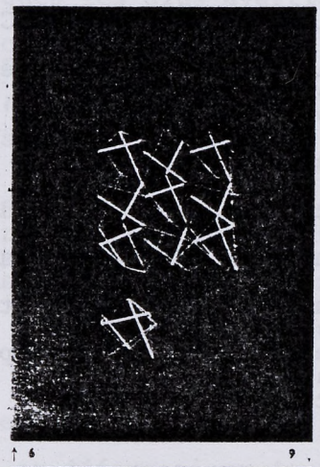


4



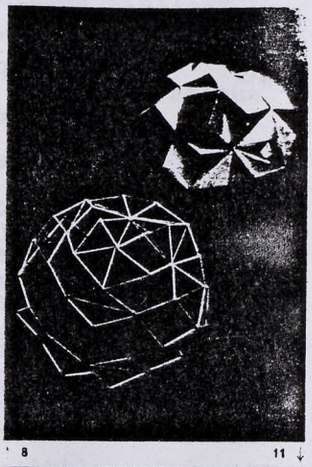
5

Zu 3: Nicht „gesättigtes" Gefüge, abgeleitet aus Oktaeder-Tetraeder-Netz, aus einem einzigen Typ von Druckstab und Zugband zusammengesetzt – Zu 4: Gefüge aus unterbrochenen Druckstäben, wiederhergestellt mit Hilfe von Untereinheiten der vorigen nach Auseinanderspannung und Drehung in bezug auf eine Senkrechte – Zu 5: Gefüge aus zwei starren, untereinander unterbrochenen Flächen, zusammengesetzt aus linksgedrehten Gleichgewichtssystemen – Zu 6: Gefüge aus unterbrochenen starren Fasern, zusammengesetzt aus abwechselnd links und rechts (gedrehten) Gleichgewichtssystemen – Zu 7: Gefüge aus ganz unterbrochenen Druckstäben und zusammengesetzt wie zu 6 – Zu 8: Das gleiche räumliche Gewölbe, eines aus Druckstäben, das andere aus Flächen konstruiert – Zu 9: Zwei Gewölbe, das eine wie bei 8 und ein größeres aus denselben Elementen einheitlicher Flächen – Zu 10: Senkrechter Blick auf das größere Gewölbe – Zu 11: Gewölbe im Schnitt

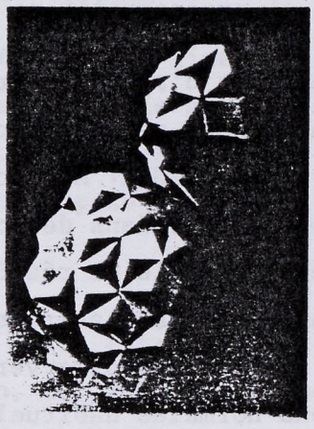


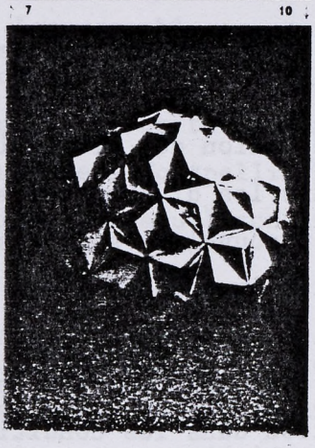
6 9

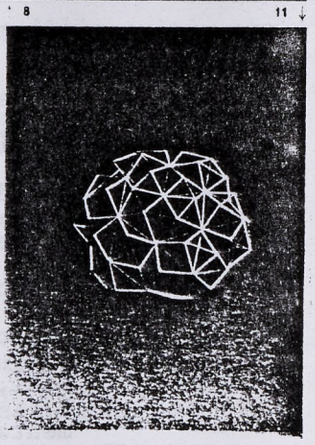
7 10



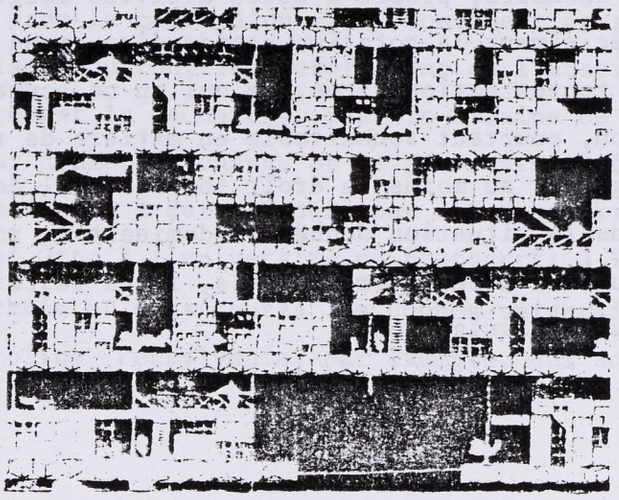
8 11

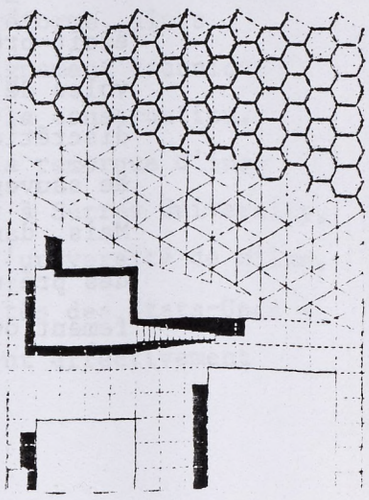






David Georges Emmerich, Paris: Stereometrische Strukturen

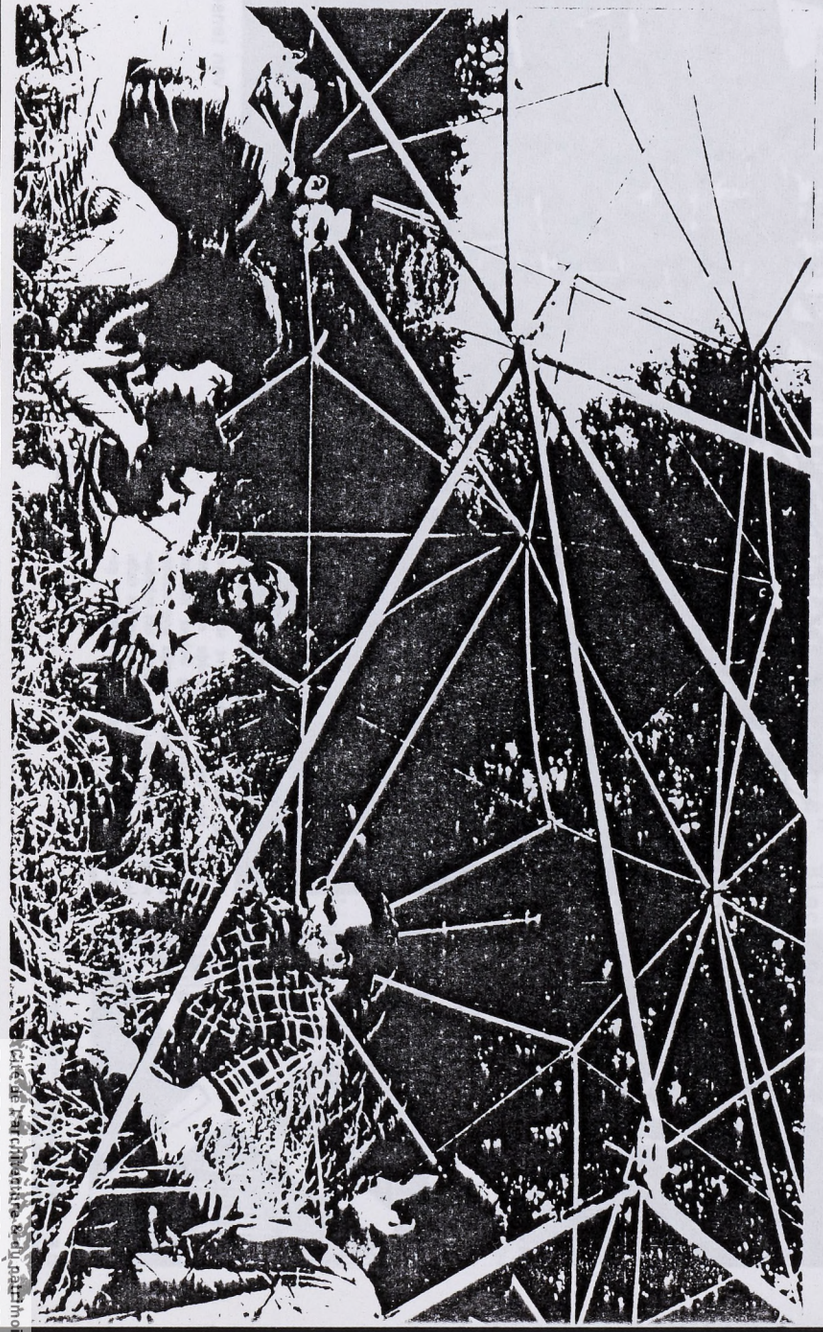


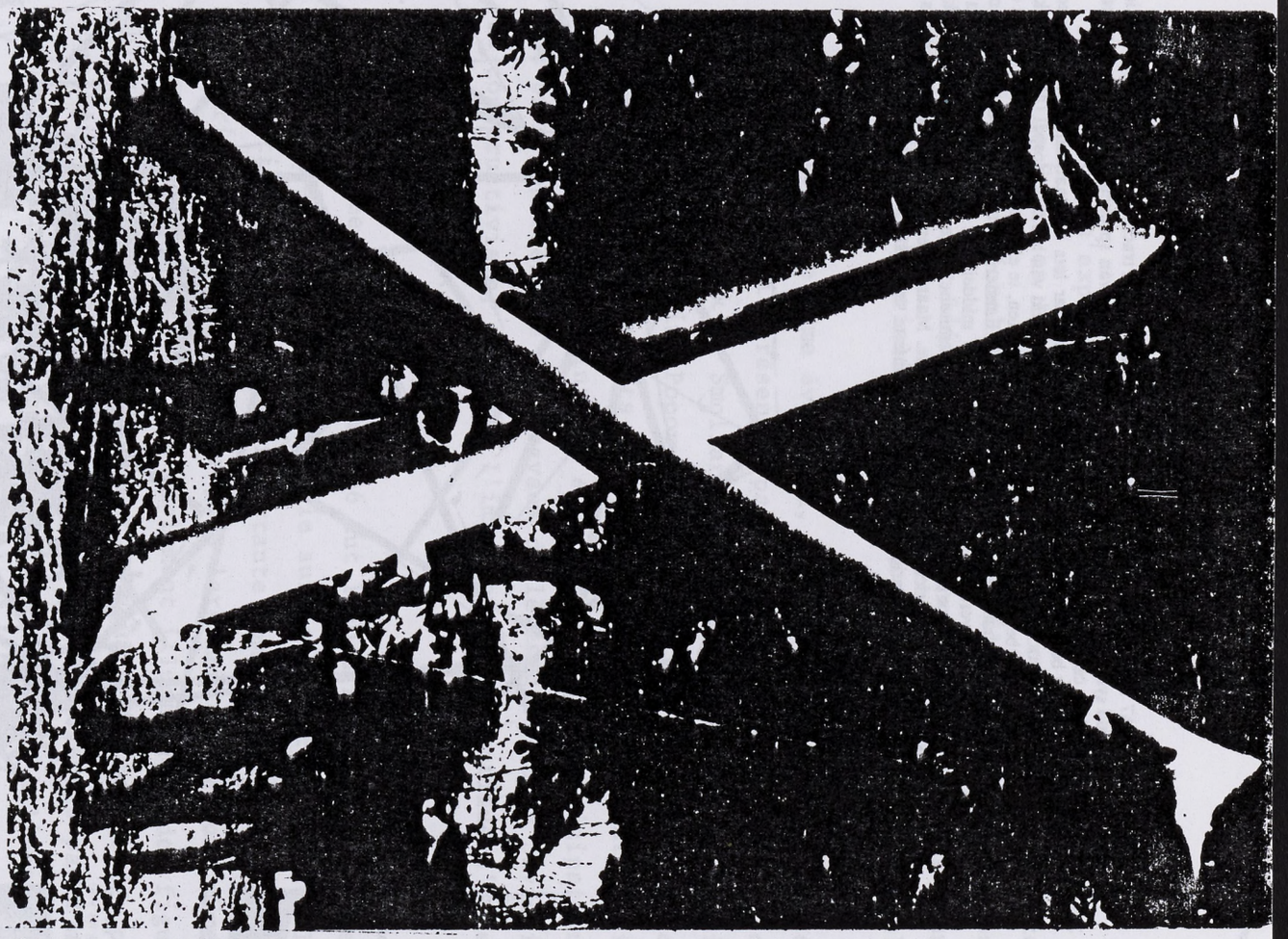


Das Material für diesen Beitrag über „Anpassungsfähige Architektur" wurde vom Büro Ruhnau in den Jahren 1960/1961 gesammelt. 1963 erfolgte die Sichtung, Bearbeitung und Zusammenstellung durch Dipl.-Ing. Winfried Terhürne. 1965 Veröffentlichung in der Zeitschrift „der architekt".

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

Modèle d'une coupole stéréométrique exécutée hors-concours par un groupe d'élèves de l'ENSBA Paris

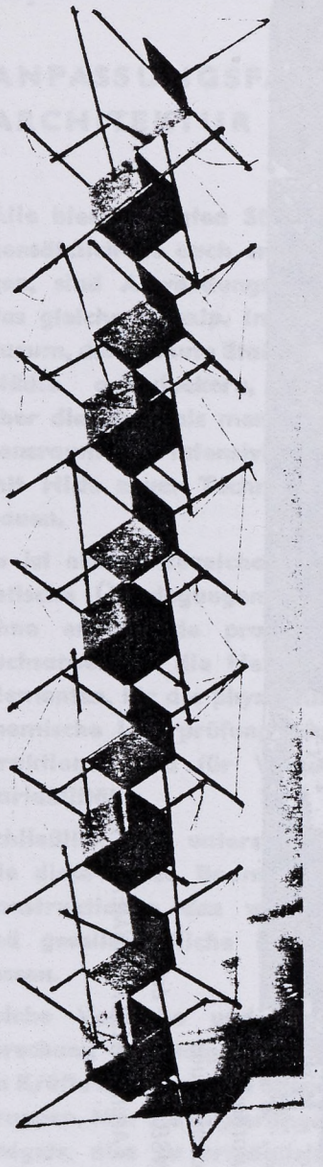




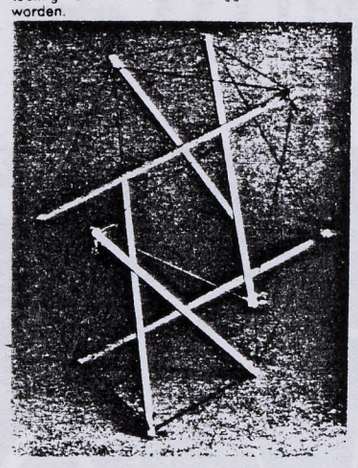
Structure autotendante à barres pneumatiques (Diplôme ENSBA par une équipe d'élèves de l'Atelier ALBERT-EMMERICH)

BIBLIOTHEQUE Cité de l'architecture et du patrimoine

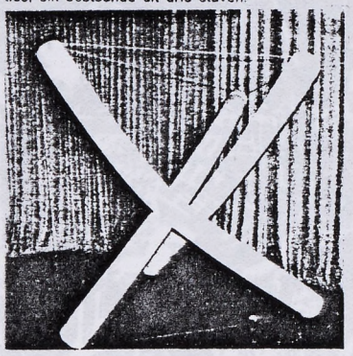
In de Groep '67 van de Academie van Bouwkunst te Amsterdam trachten wij te komen tot een iedere dubbelzinnigheid uitsluitend systeem, dat het mogelijk maakt, om bij wijze van spreken, een stad te bouwen met niet meer gegevens dan enkele codes.
De definitie van het begrip matrix luidt als volgt: de plaats waar iets ontstaat, zijn vorm aanneemt, en/of zichzelf ontwikkelt naar zekere voorwaarden. Om de uit het voorbeeld van het mikadospel (afb. 1) blijkende onregelmatigheden, die een exacte bepaling van de ruimte moeilijk maken, te elimineren, leggen we ons nu enkele beperkingen op. In navolging van o.a. de Franse hoogleraar D. G. Emmerich stellen wij: de matrix ontstaat door het in gelijke onderdelen verdelen van een ruimte door middel van punten, lijnen, vlakken of volumina. Wij kiezen déze voorwaarde voor de matrix enerzijds om economische redenen: het creëren van gelijke onderdelen opent de mogelijkheid van prefabricage, industriële produktie. Maar anderzijds stelt deze keuze ons vooral in staat om herkenbaarheid van en oriëntatie in de omgevende ruimte te versterken.



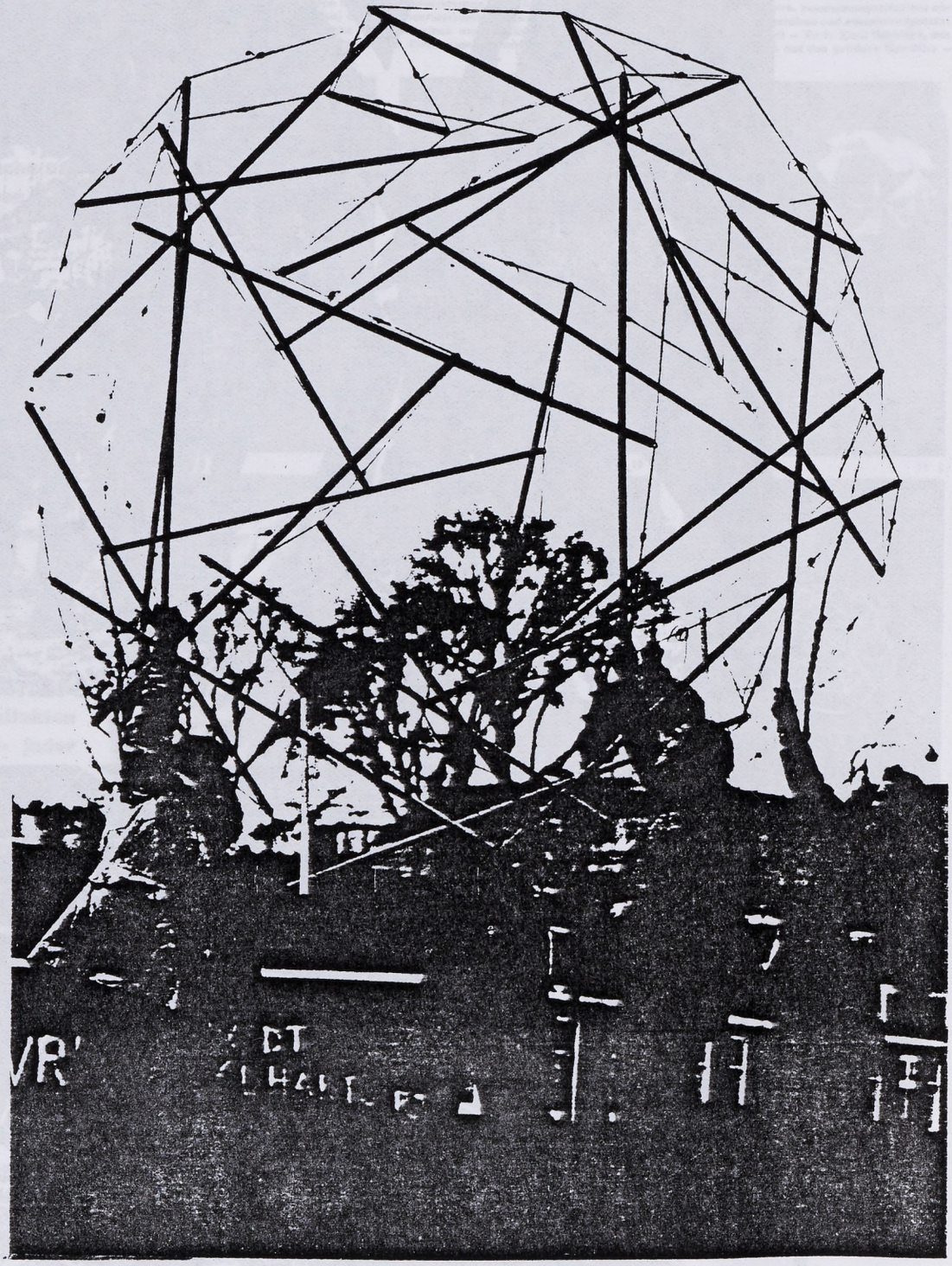
51b. Tensegrity-elementen, geschakeld tot een kolom. De kubusjes zijn hulpfiguren, die na voltooiing van de constructie weggesneden kunnen worden.



51a. Schakeling van twee tensegrity-constructies, elk bestaande uit drie staven.



51. Pneu-staven bieden de mogelijkheid een tensegrity-constructie nog lichter te maken.



Tensegrity waarbij de massieve staven vervangen zijn door luchtgevulde elementen, kunnen de constructie nog lichter maken. Dergelijke pneu-constructies zijn nog onderwerp van studie (afb. 51), evenals het schakelen van gesloten tensegrity-constructies (afb. 51a en 51b), zoals dat bij close-packing gebeurt.

De triomf van tensegrity; code 5.6.6.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Ainsi s'explique, par exemple, notre surprise pendant le Congrès de l'UIA de Paris en 1965 de voir un mât autotendant de ma conception, brèveté, monté à grande échelle par un groupe d'élèves d'une école londonienne, récupéré gaillardement par l'intermédiaire d'un transfuge pour la bonne cause de l'avancement de l'industrialisation légère et dont je ne pouvais plus que me féliciter.

Lors de ce même évènement, une série d'élégantes maquettes de structures autotendantes était présentée par deux élèves de la faculté d'architecture de Moscou, Koleitchouk et Smoliarov, travaux élaborés sous la direction des professeurs Bernstein, Popov et Toupolev. Une partie de ces compositions, notamment les arrangements coniques hélicoïdaux étaient des inventions originales et d'un grand intérêt structural. Cette participation représentant une part considérable des travaux d'élèves de l'Union Soviétique, pays natal du constructivisme, prouvait l'importance qui continue d'être accordée à ce type de structure.

L'année suivante, en 1966 eut lieu à Battersea College, Angleterre, la 1 ère Conférence Internationale sur les Structures Spatiales, où en publiant sous le titre "Réseaux" une importante communication, reproduite en annexe, j'ai pris le parti de diffuser plus largement la méthode même de construction des autotendants. Cet article amplement illustré par des figures et photographies de modèles, fut pratiquement le seul qui s'occupa des problèmes de topologie structurale et de formes nouvelles obtenues par l'analyse de l'espace parmi des centaines de communications consacrées à l'analyse des contraintes dans des systèmes déjà connus. Cet article est souvent cité en référence depuis l'édition en volume des "Conférences Papers", Blackwell Scientific Publications, Londres 1966, dans les monographies consacrées depuis lors aux structures spatiales, généralement sans autres précisions et que nous abstiendrons également de mentionner nommément. Certes, depuis un certain temps le nom des maîtres d'oeuvre a cessé de figurer sur les ouvrages.

Il n'en reste pas moins, que depuis une quinzaine d'années, nombreuses sont les universités, principalement à l'étranger, où les recherches sur les autotendants sont pousuivies intensivement: en France, à l'UPA de Nantes, Alain Chassagnoux en collaboration avec A.Chomarat et J.Savel, ont mis au point une méthode de représentation et de calcul sur ordinateur - voir leurs importantes communications reproduites en annexe. En Allemagne, il faut mention-

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

ner: Günther Günschel au laboratoire de recherche structurale de l'Université Technique de Hanovre; Gernot Minke qui a organisé en 1970 à l'Université de Stuttgart un séminaire consacré uniquement aux autotendants et qui continue actuellement de travailler au Hochschule de Kassel. En Hollande: Onno v. Dokkum et d'autres chercheurs à Arnhem, Amsterdam et à l'Université Technique d'Eindhove où j'ai eu l'occasion de diriger un séminaire. Aux Etats-Unis à l'University of Washington, Seattle, qui organisait également un séminaire me permettant de construire quelques structures; et outre les autres établissements déjà évoqués au Pratt Institute de New-York où l'enseignement morphologique tient une place importante. Au Canada, à l'Université de Montréal qui édite la revue "Topologie Structurale", et où se poursuivent des recherches sur la rigidité structural. En Israel, au Technion de Haïfa, où l'équipe Wachman, Burt, Kent et Nikomarov cultivent la morphologie. Enfin en Union Soviétique dans les Universités de Moscou et de Leningrad, dont les chercheurs présentent dans les congrès de nombreuses publications sur ce sujet.

A Paris même, sous ma direction, un enseignement actif inspiré de la méthode de Konrad Wachsman et fondé sur la recherche structurale ne pouvait se poursuivre plus de deux semestres par suite de la désorganisation des études d'architecture. Les résultats de cette brève période d'activités, improvisées plutôt qu'organisées, étaient recueillies dans un ouvrage de 380 pages souvent cité, ayant pour titre "Exercices de Géométrie Constructive" édité en 1970 par le Centre de Diffusion de l'ENSBA et réimprimé en 1985 par l'Edition de la Villette. Une partie importante des travaux publiés là est consacrée aux structures autotendantes, réalisées en acier, aluminium, bambou et même en gonflable.

Il serait fastidieux d'énumérer les démarches entreprises particulièrement durant la décade 1965-75 auprès d'organisations diverses en vue de développer ces techniques, sans oublier les efforts de toutes sortes pour obtenir et maintenir des brevets d'invention dans plusieurs pays. Les quelques tentatives opérationnelles en vue de réaliser quelques objets à l'échelle grandeur, et qu'on exposera plus loin parmi les possiblités d'application restaient, autant d'expériences avortées, tant par l'inadéquation de la législation technique que par les particularités de mes commanditaires de "fortune". Ce n'est qu'en 1976 que j'étais enfin chargé, dans le cadre d'un contrat CORDA (Comité de la Recherche et du Développement en Architecture) d'un programme portant sur les "Systèmes stéréométriques et structures autotendantes". Cette mission de recherche qui s'étendait sur deux ans consistait:

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

- A présenter de manière systématique selon une classification de type topologique l'ensemble des "systèmes stéréométriques" (formes constructibles par éléments répétitifs) et ce par familles géométriques:

- polygones: figures fermées composées d'arêtes identiques
- tessellations: partitions planaires composées de polygones
- polyèdres: solides convexes composés de polygones
- réseaux double nappe composés à base des tessellations
- empilements compacts: réseaux composés de polyèdres

- A décrire la composition des structures autotendantes, (classe particulière des réseaux stéréométriques réalisables) également par familles:

- les solides élémentaires autotendants composés de configurations prismatiques et antiprismatiques
- les solides autotendants composites construits à base de polyèdres réguliers ou semi-réguliers
- mâts linéaires composés avec un axe droit ou courbe
- réseaux à double nappe composés en surface droite ou courbe
- les empilements autotendants composés en espace continu

Les résultats de ces recherches, dont le rapporteur était le regretté Jean Paul Lesterlin, étaient rendus dans les délais, sous la forme d'un volume de 361 pages comptant 1556 figures et 31 tableaux récapitulatifs. Environ mille photographies de quelques deux cents maquettes d'étude étaient prises en vue de leur insertion dans l'édition destinée au public, qui constituait l'objectif final du contrat.

La disparition du promoteur de ce projet, et autres changements dans l'administration, ont empêché la réalisation de cette édition, dont le financement était pourtant promis et sans lequel il est impossible - vu la stratégie actuelle des éditeurs français - de mettre en forme définitive, imprimer et diffuser un manuel de cette importance. Ils préfèrent, en effet, la confection d'ouvrages en prise directe avec l'actualité - expositions, concours, réalisations - assurant une rentrée de fonds rapide, plutôt que d'investir dans un ouvrage de référence s'adressant à un public restreint, supposant une vente continue, donc un stockage et une immobilisation de capitaux relativement longs.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

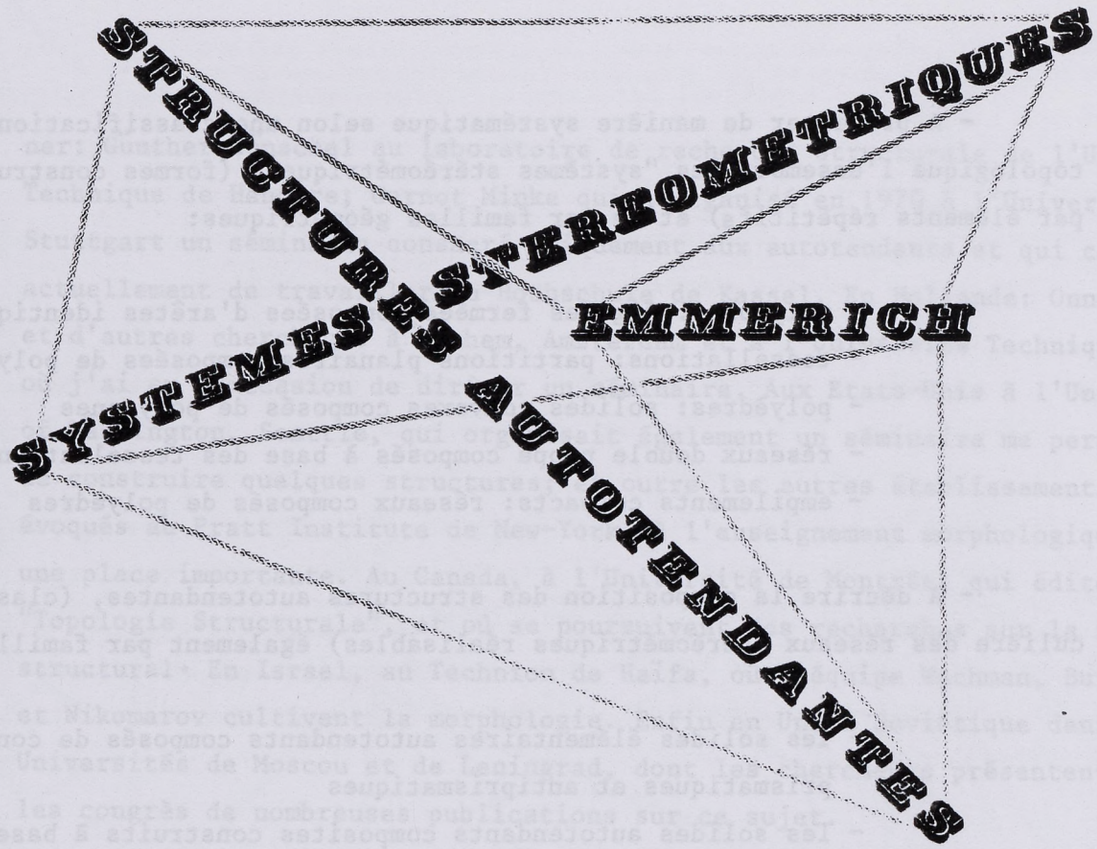


TABLE DES MATIERES

	page
INTRODUCTION	3
SYSTEMES STEREOMETRIQUES	15
POLYGONES ET TESSELLATIONS	17
Assemblage des polygones	18
Tessellations régulièers, semi-régulières, composites	28
Tessellations automorphes	70
POLYEDRES	79
Polyèdres isocèles	82
Polyèdres réciproques	102
Polyèdres composites	112
RESEAUX	141
Corrugations	142
Réseaux double nappe plans	149
Réseaux double nappe courbes	160
EMPILEMENTS	163
Empilements compacts	166
Empilements lâches et Hyperpolyèdres	191
STRUCTURES AUTOTENDANTES	215
CONSTRUCTION AUTOTENDANTE	217
Autotendants élémentaires	223
Autotendants composites	230
Polyèdres	250
MATS	275
Mâts juxtaposés	280
Mâts interpénétrés	288
Mâts entrelacés	298
RESEAUX DOUBLE NAPPE	305
Réseaux plans	305
Réseaux courbes	330
EMPILEMENTS AUTOTENDANTS	341
Empilements par juxtaposition	341
Empilements à barres discontinues	345
BIBLIOGRAPHIE	358

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Cela n'exclut pas que, par le nombre d'exemplaires en circulation, le contenu de ces rapports de recherche se diffuse confidentiellement, portant préjudice et à la propriété intellectuelle de l'auteur et aux droits de l'administration qui a financé les études.

Après de vaines tentatives auprès de l'ANVAR (Agence Nationale de Valorisation de la Recherche), présentant plusieurs programmes d'application, j'ai répondu à divers appels d'offres lancés par le Plan Construction ou le CORDA, ayant pour thèmes: la production d'architecture; l'industrialisation de l'architecture; composants de construction; innovations constructives; procédés techniques; techniques exportables etc., mais chaque fois, apparamment, il n'existait aucune correspondance entre ces thèmes et les structures autotendantes - selon l'avis des autorités compétentes.

Les uns jugeaient ces recherches trop théoriques, les autres, au contraire, trop techniques. Mais, pour les rendre moins théoriques, on refusait les propositions pour leur expérimentation, voir notre programme présenté dans le cadre du CRMAA de l'UP de Nantes avec Chomarat, Chassagnoux et Savel; et pour les rendre moins techniques, on refusait également leur insertion dans le cadre des études architecturales plus générales, voir le rejet récent de la constitution d'un CEA (Certificat d'Etudes Approfondies) par une équipe élargie, comprenant des enseignants de l'UP.1 autour du thème de "Morphologie et structures industrialisées".

Pour vaincre les résistances et convaincre, nous avons réalisé à l'occasion du XIVème Congrès de l'UIA en 1981 un empilement autotendant, une configuration spectaculaire, qui peut être considérée comme la "structure absolue", réponse à un problème posé depuis longtemps aux chercheurs comme une sorte de gageure. Aidé par l'administration de l'UP.6 et par un groupe d'élèves, cette structure élaborée pour être rapidement dépliable était préfabriquée, prémontée, transportée puis déployée en moins d'une heure devant le Palais de la Culture de Varsovie. Elle a été remontée en 1982, lors de l'exposition Inter-UP. au Palais des Etudes à l'ENSBA puis proposée en 1983 au Concours de la Défense comme ossature porteuse, voir projet présenté parmi les possibilités d'application.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CADRE DE VIE

Direction
de l'Architecture

Sous-Direction de la
Création Architecturale et des
Constructions Publiques

Secrétariat de la
Recherche Architecturale

SRA 266

3, rue de Valois - 75042 Paris Cedex 01

18.08.78

Monsieur,

Vous avez déposé un projet de recherche qui a été enregistré à la Direction de l'Architecture sous le n° 5 . Votre projet portait sur Application architecyurale et technologie des structures autotendantes.

Votre projet, qui se situait expressément en dehors du champ de l'appel d'offres 1978 et qui ne pouvait être rattaché à l'un ou l'autre de ses thèmes n'a pu être reçu à cette session.

Veuillez agréer, Monsieur , l'assurance de ma plus vive considération.

Francis CHASSEL
Administrateur Civil chargé
de la Recherche Architecturale

Monsieur EMMERICH
37 avenue de Breteuil
75007 PARIS

PLAN CONSTRUCTION 29 JUIN 1979
SECRÉTARIAT PERMANENT

'PC - GH/HT

Monsieur D.G. EMMERICH
37 avenue de Breteuil

75007 PARIS

et : Appel de propositions
s techniques exportables".

Monsieur,

Vous avez déposé un projet de recherche, enregistré au numéro 35 - 79 au Secrétariat Permanent du Plan Construction, ayant pour objet :

Techniques d'autoconstruction légères à empilement stéréométrique.

J'ai le regret de vous annoncer que, à la suite des délibérations du jury, votre projet n'a pas été retenu pour les raisons suivantes :

Le rapport avec l'exportation semble très lointain.

De tels travaux semblent plus relever de crédits CORDA que d'un tel appel de propositions.

En vous remerciant cependant de votre participation,

Je vous prie d'agréer, Monsieur, l'assurance de mes sentiments distingués.

Guy MAUGIS

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CADRE DE VIE

AVENUE DU PARC DE PASSY 75016 PARIS CODE POSTAL 7577 PARIS CEDEX 16 TEL 524 52 34

PLAN CONSTRUCTION
SECRÉTARIAT PERMANENT

HP/FD

Paris, le 9 juillet 1979

Monsieur D.G. EMMERICH
37, avenue de Breteuil

75007 PARIS

APPEL DE PROPOSITIONS
"Matériaux, Composants, Techniques de Construction et Environnement

Monsieur,

Vous avez déposé une proposition, enregistrée sous le n° 12-79 au Secrétariat Permanent du Plan Construction, ayant pour objet :

- L'application architecturale et technologique des structures autotendantes.

J'ai le regret de vous annoncer que, à la suite des délibérations du jury, votre projet n'a pas été retenu pour les raisons suivantes :

- Il n'est pas sûr qu'un catalogue d'exemples sur papier, encore très théoriques, puisse déboucher sur un réel dialogue avec les architectes et professionnels.

- Il semble que le problème primordial de l'association de ces structures avec des matériaux de remplissage soit fortement éludé. C'est cependant par là qu'on abordera sérieusement l'aspect constructif.

En vous remerciant cependant pour votre participation, je vous prie d'agréer, Monsieur, l'assurance de mes sentiments distingués.

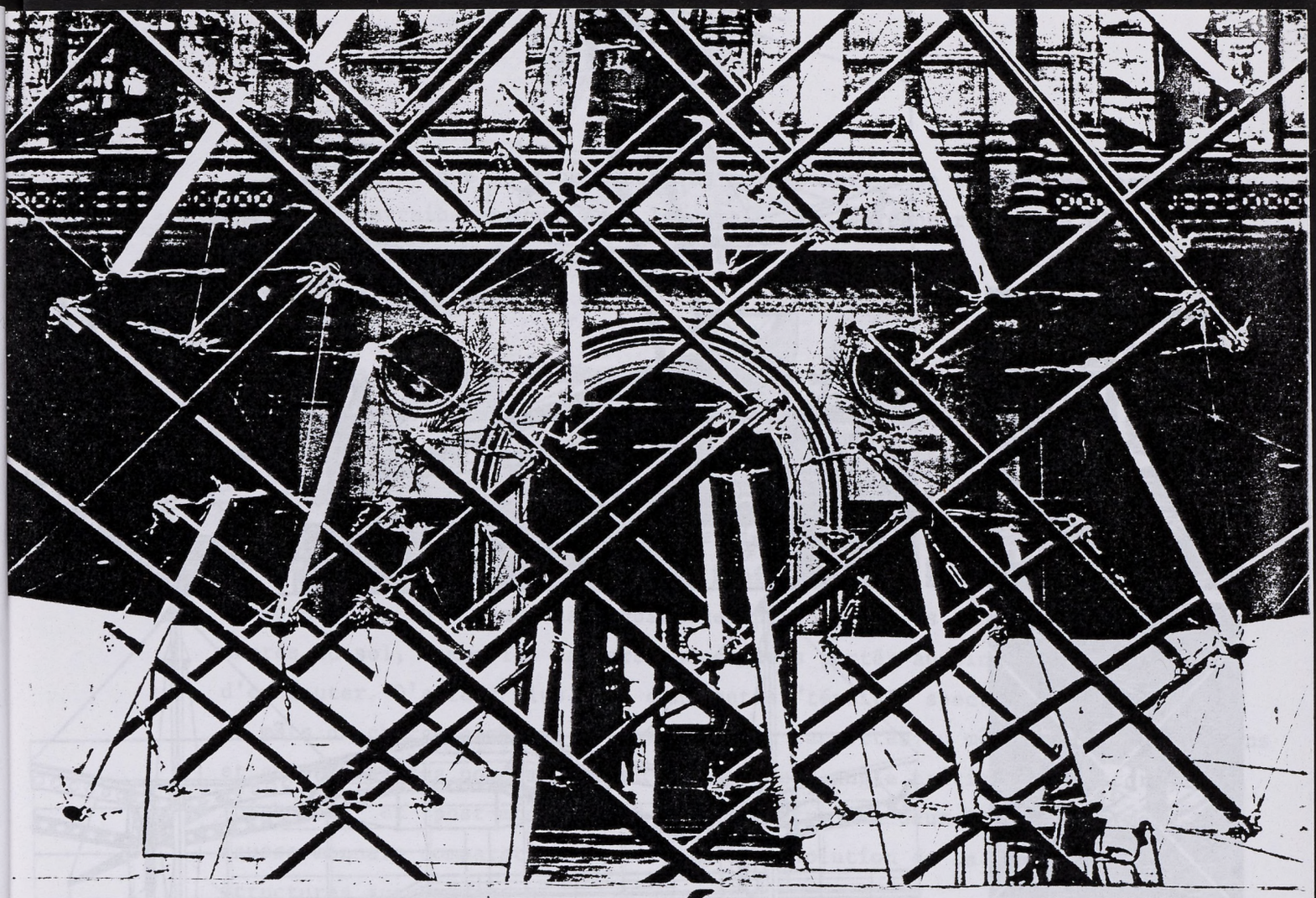
Hubert PENICAUD

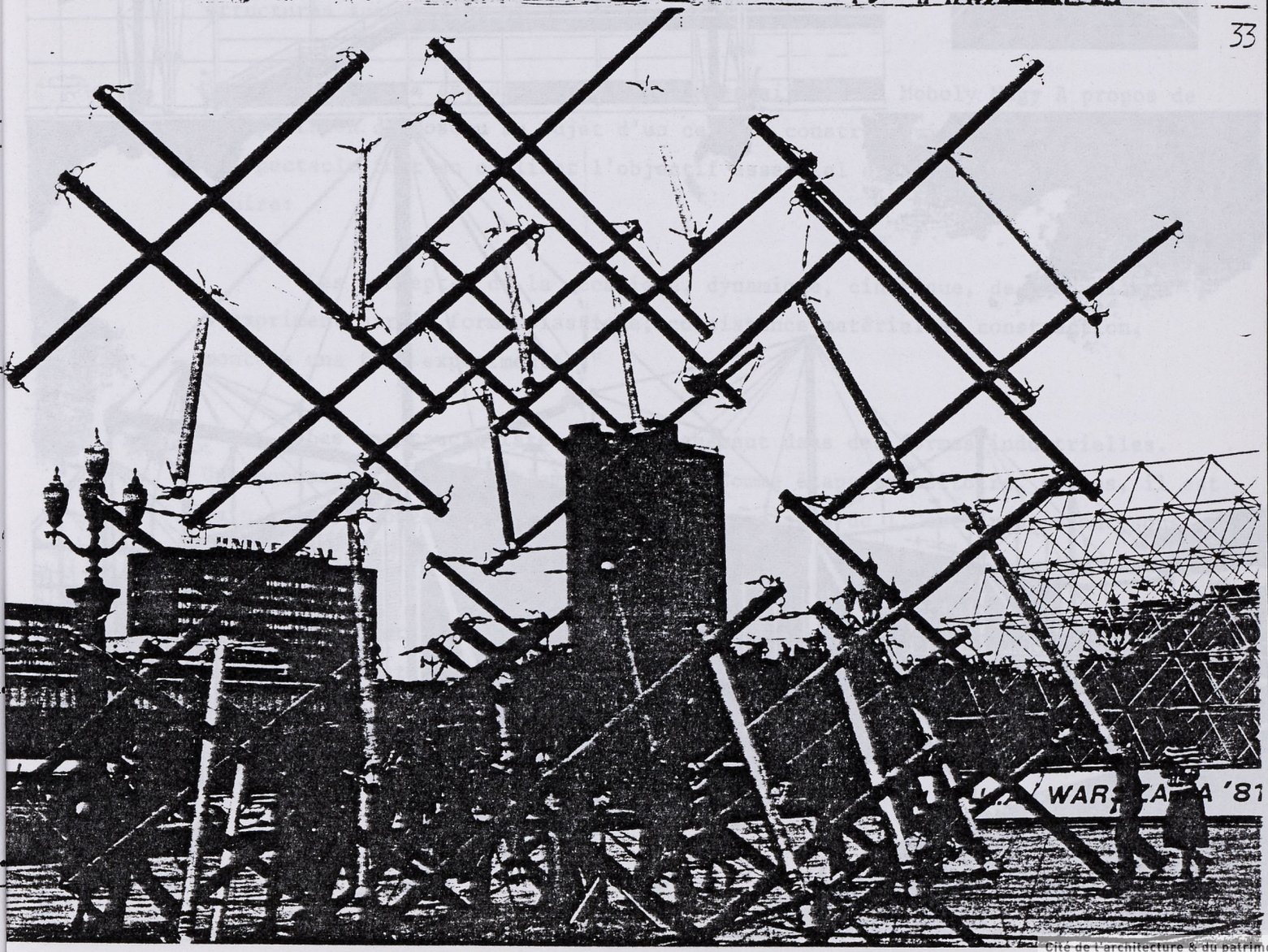
Expert-Consultant auprès
du Plan Construction

P.S. : Un appel d'offre centré sur les mêmes préoccupations sera lancé courant 1980, auquel vous solliciterons que vous participerez.

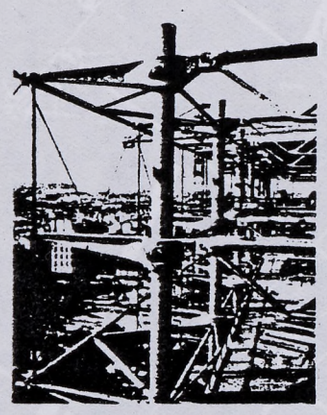
TEL 524 52 34

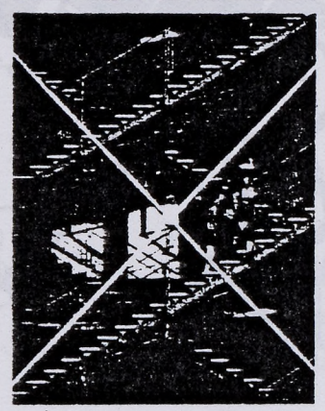
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

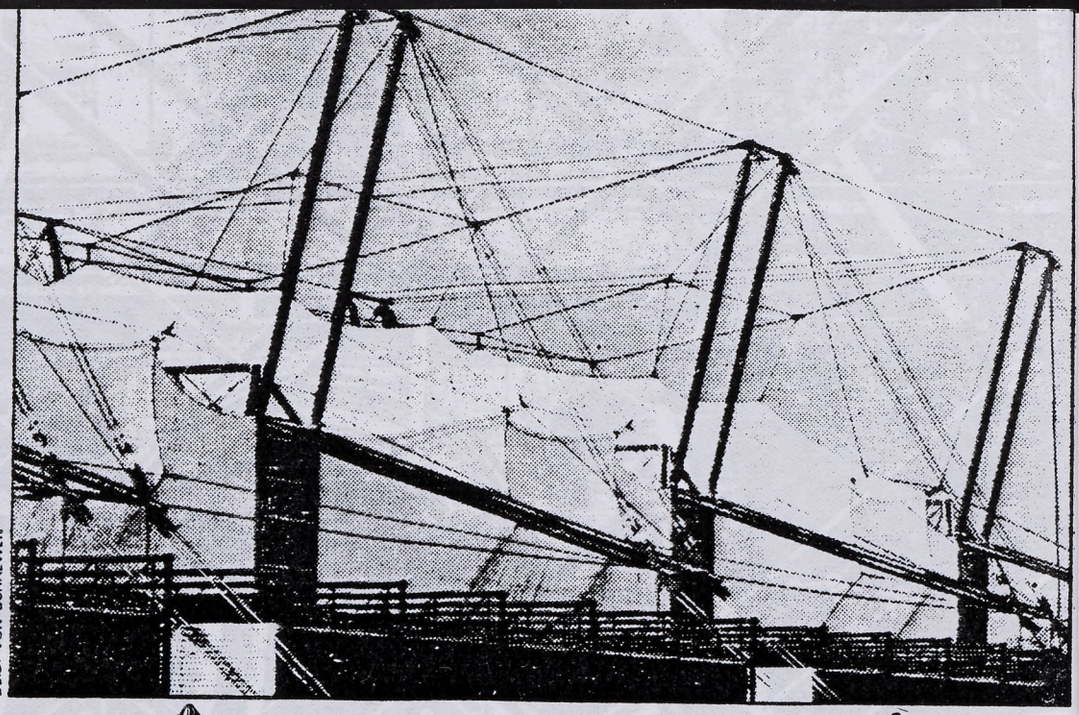




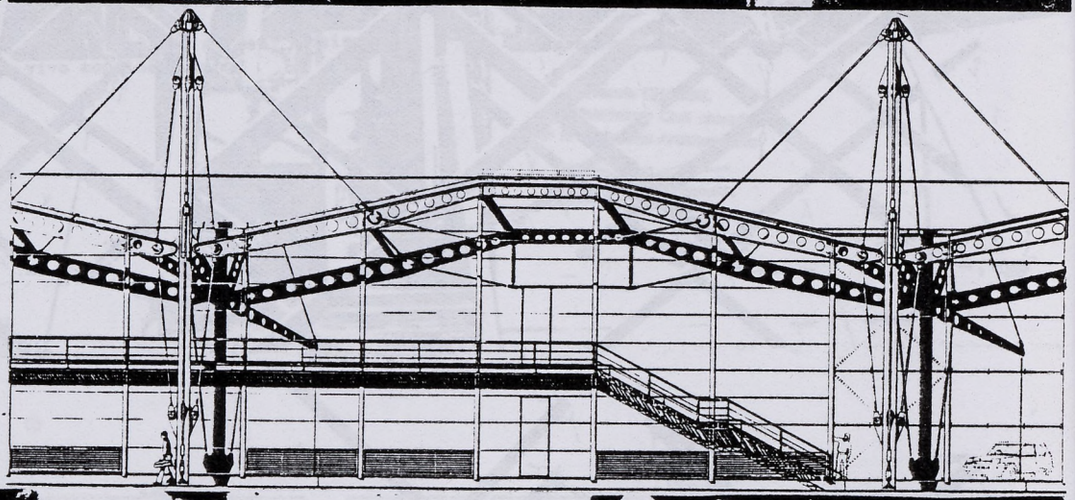
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

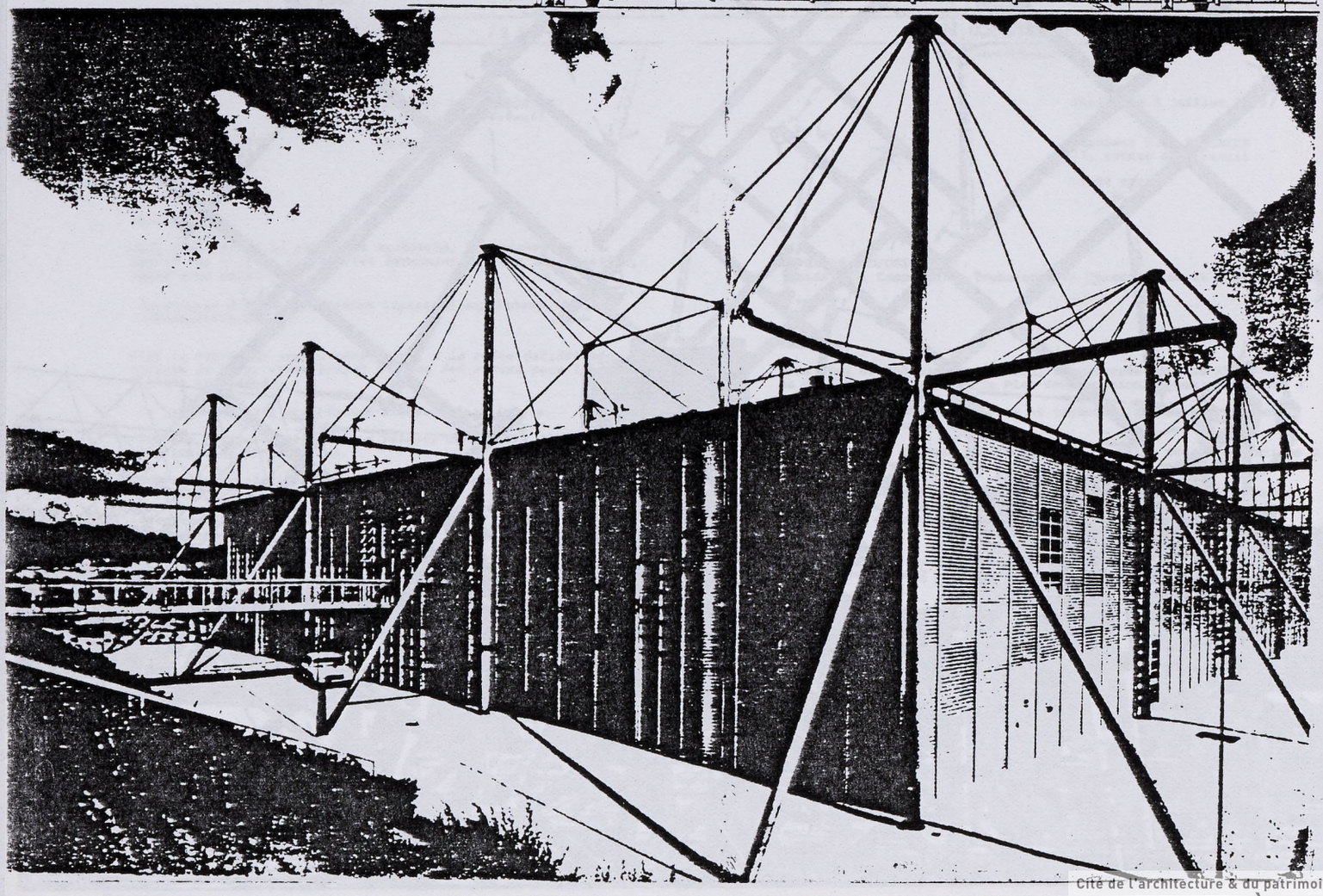






DEIDI VON SCHAEWEN





Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

L'historique des constructions autotendantes se termine par ces ultimes exploits, certainement non sans lendemain, vu la réapparition de plus en plus fréquente des structures tendues à l'étranger et même en France - en tant que technologie importée.

Mais, malgré le brusque succès de cette technologie nouvelle et/ou avancée, certains déjà s'interrogent: le "high tech" actuel est-il un style? Celui qui réhabilite le modernisme? Ou celui qui succède au post-modernisme?

Aussi longtemps que leur conception structurale reste au niveau des croix de St André de la chocolaterie Menier, voir le tant admiré Centre Beaubourg, ou au niveau des haubannages pyramidaux des chapiteaux forains ancrés au sol, comme les hangars industriels portés au pinacle, il est permis d'en douter. D'autant plus, que dans cette "ténuité" spectaculaire, câbles et mâts de charge semblent redondants donc rapportés au même titre que frontons et colonnades des post-modernes. Vus sous cet angle critique et historique, "high tech" et "post-modernisme" semblent être les deux faces de la même fausse monnaie comparativement au degré d'évolution de la conception des structures autotendantes.

La réponse est donnée par le commentaire de L. Moholy Nagy à propos de l'exposition de Moscou au sujet d'un certain constructivisme qui se donnait en spectacle tout en oubliant l'objectif essentiel et concret de mieux construire:

"Les concepts de la mécanique, dynamique, cinétique, de l'équilibre s'expriment par la forme plastique; consistance matérielle, construction, montage une fois expérimentés."

"Les constructivistes se débauchèrent dans des formes industrielles. Une monomanie technique s'empara d'eux. Comme étape transitoire, certes, il est sain que les conceptions poussiéreuses et moisies de l'"art" renaissent sous un autre aspect et à une nouvelle échelle."

"Le plasticien comprend à peine la complexité des tâches des ingénieurs: composition,section d'or et leurs semblables sont bien enseignés dans les académies mais rien de la statique, bien que sa connaissance pourrait le mener plus que les règles esthétiques à des modes de réalisation économiques..."

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

LES STRUCTURES METALLIQUES PRECONTRAINTES

La consommation d'acier à usage structural atteint des dizaines de millions de tonnes par an. Son emploi, cependant, est fondé sur des schémas le plus souvent rigides: soudés, rivetés ou boulonnés. Les techniques de précontrainte et des joints mécaniques offrent des solutions structurales de plus haute efficacité grâce à une augmentation considérable de l'indéformabilité géométrique aboutissant à une économie de matériaux et à une réduction importante des prix de revient. Mais, l'abaissement du poids propre, l'allègement, n'est possible qu'à condition de choisir des formes constructives particulières plus propres aux structures métalliques. La facilité d'industrialisation de ces structures met en avant toute une série d'autres critères qui orientent, conjointement avec le développement récent de moyens d'investigation plus scientifiques, l'évolution des systèmes constructifs. Des points de vue technique et économique on peut énumérer sept critères qui doivent présider à la conception des constructions:

- facilité de fabrication en série d'un nombre restreint de types d'éléments
- poids minimal à résistance égale
- consommation minimale de main d'oeuvre lors de la fabrication
- volume minimal pour le transport
- facilité d'assemblage lors du montage
- démontabilité et facilité de réutilisation de tous les composants
- prix de revient minimal

Au delà des questions de sécurité et de longévité propres à toutes les structures métalliques, ces sept critères impliquent, en premier lieu, la nécessité de progrès en matière de la théorie de la conception des formes - la morphologie. En effet, la décomposition normée des espaces construits ne peut être abordée que grâce à une nouvelle stéréotomie. Du point de vue pratique ceci consiste à réaliser à base de formes constructives nouvelles un large éventail de bâtiments à toutes destinations composés de quelques

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

produits standard. Ces constructions, par leurs avantages techniques et économiques considérables, augmenteront d'une manière révolutionnaire la productivité de l'industrie du bâtiment en réduisant le coût et le temps consacrés aussi bien à la conception qu'aux opérations de la fabrication et de l'érection.

En somme - et c'est l'évidence même - la réduction du prix de revient de toute construction est essentiellement la coalition de la production en chaîne et en masse d'éléments répétitifs, d'une part, et la possibilité d'assemblage rapide à sec, à l'aide de joints mécaniques, d'autre part, ceci quelle que soit l'échelle d'utilisation des systèmes constructifs. Mais, qui dit construction légère dit aussi absence de pesanteur, force de cohésion indispensable dans les structures massives. Cette force doit être obtenue par un autre moyen dans une structure légère. La solidification globale de l'ensemble est donc assurée par une force précontrainte, qui se révèle, en même temps, source d'allègement complémentaire.

Depuis les années 50, la méthode de précontrainte, après avoir été largement employée dans la construction en béton armé, a conquis progressivement sa place dans le domaine de la construction métallique. Les avantages des principes précontraints se trouvent dans la possibilité de contrôler dans une structure l'état des tensions internes selon le souhait du concepteur tout en rendant économique l'emploi des aciers de haute résistance. Le principe de la précontrainte consiste à créer à l'intérieur de la structure des contraintes qui seront équilibrées, diminuées ou même annulées lors de la mise en charge utile, aboutissant à l'augmentation globale de la capacité porteuse de l'ensemble.

Dans les cas les plus simples, la mise en précontrainte est obtenue en impliquant une flexion (flèche) par la mise en tension des fibres tendues, provoquant des contraintes de signe inverse à celui provoqué par les surcharges d'exploitation normales. Dans une première étape, quand la structure est en charge, la précontrainte est annulée; c'est seulement par la suite, sous l'effet d'une surcharge complémentaire que la section commence à être sollicitée pour atteindre la contrainte admissible - d'où une économie. Habituellement, l'application de la précontrainte provoque dans la structure des déformations qui sont compensées par la mise en charge utile.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Dans le cas des structures autotendantes, qu'on peut considérer comme une classe particulière des précontraintes, ce phénomène se présente sous une forme plus complexe étant donné qu'elles ne sont pas composées linéairement mais en volume: les fibres tendues constituant un treillis en forme de polyèdre ou un réseau résultant de l'assemblage de tels solides.

La mise en tension de ces membrures travaillant à la traction est obtenue par des contrevis ou tout autre système mécanique raccourcissant la longueur des tirants; ou bien par des vérins mécaniques ou même hydrauliques permettant un réglage en extension des barres de compression; ou les deux méthodes à la fois.

Pour les éléments de traction l'intensité de mise en tension n'est limitée que par la résistance admissible spécifique du matériau. Quant aux éléments de compression, cette résistance est diminuée par les effets de flambage auquels les barres sont sujètes et dont on peut aisément déterminer le degré par l'une ou l'autre des méthodes en usage pour calculer la longueur libre de flambage suivant les conditions d'utilisation, qualité des matériaux et l'élancement de la pièce sollicitée.

La structure précontrainte peut,en outre, être munie de toutes sortes d'instruments de mesure contrôlant en permanence les contraintes, déformations, stabilité, ampleur et fréquence des vibrations. Pour combattre les vibrations provoquées par les surcharges dynamiques et par les résonnances accoustiques ou autres, des amortisseurs peuvent être intercalés entre les éléments.

Pendant les années 60, un grand nombre d'études a été consacré au développement des structures métalliques précontraintes classiques à usage industriel ou ouvrages d'art, couvertures de grande portée et ponts. Le développement de ces systèmes avait permis d'accroître la performance et la sécurité des constructions. Depuis Septembre 1963, date de la première Conférence Internationale sur les Structures Métalliques Précontraintes, des symposiums réguliers sont organisés sur ce sujet attirant des centaines de délégués des institutions de recherche et des universités techniques du monde entier, venant aussi bien des pays industriels occidentaux que des pays de l'Est, ces derniers étant d'ailleurs le plus souvent les organisateurs et hôtes de ces réunions.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Les axes de recherche, qui constituent généralement autant de secteurs ou "panels" regroupant les intéressés, sont actuellement définis par les sujets suivants:

- Elaboration d'une théorie de conception des formes
- Elaboration des structures porteuses précontraintes de type nouveau
- Etude et élaboration des processus de conception
- Elaboration des structures précontraintes sous des forces variables, température et effets cycliques
- Elaboration des théories d'optimatisation
- Réalisation et choix des profils des membrures précontraintes
- Recherche des méthodes de consolidation des structures et de leur indéformabilité
- Elaboration des systèmes d'enclosure précontraints en acier et en aluminium
- Etude des méthodes de fabrication et d'érection des structures tendues
- Analyse économique et technique comparative des structures précontraintes

Ces quelques dix aspects, qui sont devenus pratiquement autant de disciplines à l'intérieur de la profession des constructeurs, témoignent du haut degré de spécialisation atteint dans ce domaine durant les 20 dernières années, se traduisant par des centaines d'articles consacrés à ces sujets. A titre d'exemple, les 170 rapports de la 3ème Conférence Internationale tenue à Léningrad en 1971 ont été édités en cinq volumes soit quelques 1.800 pages au total. Aucune communication française ne figurait parmi ces publications, malgré l'existence d'un nombre considérable de centres techniques et scientifiques des multiples branches du bâtiment. La majorité des rapports était présentée par l'Union Soviétique et les autres pays de l'Est; le reste par les USA, le Japon, la Suède et l'Allemagne Fédérale.

La raison de l'absence d'une participation active de la France se trouve évidemment dans la stérilité des institutions de recherche censées promouvoir cette activité, indispensable à toute industrie qui veut augmenter sa productivité pour rester compétitive. Il n'en reste pas moins qu'une pléthore d'organismes étatiques, sectoriels, scolaires, etc. sont, cependant, attitrés à cette tâche, travaillant souvent parallèlement ou même concurrentiellement. Ainsi, par exemple, dans le domaine de l'acier, des dizaines d'instituts, centres, ou offices ont été crées au nom de la recherche auprès

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

des fabricants de matériaux, des entreprises et fédérations professionnelles, puisant leurs fonds dans les cotisations syndicales, taxes parafiscales ou d'apprentissage et de toutes sortes de contributions dérivées du chiffre d'affaires des entreprises, primes d'assurance et prélèvements corporatifs, etc. De ce fait, chaque profil - tube, tôle, extrusion à chaud ou à froid - et suivant la nature du métal - fer, fonte, acier, aluminium - dispose de son centre de recherche pour tester, labéliser, diffuser des produits, mais aucun centre n'existe pour centraliser, c'est à dire assembler les connaissances en vue de la conception et expérimentation de l'objectif architectural primordial - la structure - dans laquelle tous ces matériaux trouveront leur juste place et l'application la plus judicieuse.

Périodiquement passe un courant de prise de conscience, parfois même au niveau interministériel et "pour encourager la recherche technique dans une profession toute entière" on crée un nouveau Centre Technique coiffant ceux qui existent déjà. Mais, a peine installé dans ses locaux, ayant fait le plein des ingénieurs de tous grades et de la dose de personnel auxilliaire adequat, on déclare déjà qu'il "ne compte pas créer ses propres laboratoires de recherche pour autant que la nécessité ne s'impose pas". Et la nécessité ne s'imposera jamais. Comme d'ailleurs sa suppression non plus. A défaut de recherche, raison d'être initiale, mais à la recherche d'un justificatif de sa raison d'être,le centre dégénèrera en une vulgaire société de service, après avoir passer son temps à lambiner sur les problèmes de protection d'incendie, de corrosion ou d'analyse de résistance des matériaux qui se posent une fois de plus au niveau de la matière et non au niveau de l'assemblage, c'est à dire au niveau de la conception structurale. Dans le meilleur cas, le principe de ces institutions semblent être: nous prenons tout le budget de la recherche et on s'organise pour la coiffer. Puis ce sont ceux qu'on coiffe qui la feront - sans budget... s'ils y arrivent. Et, ils n'y arrivent pas, évidemment. Dans vingt ans ou plus tard, une nouvelle prise de conscience provoquera la création d'une de ces nouvelles institutions à combustion interne et une tête de plus se rajoutera à cette hydre hydrocéphale.

La cause de l'échec chronique de ces institutions réside probablement dans la dichotomisation totale de l'enseignement des intervenants dans la production dite "du cadre bâti": les architectes étant des plasticiens plutôt que des constructeurs; quant aux ingénieurs, surtout ceux formés par les

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

grandes écoles, leur formation en matière de techniques architecturales et de compositions structurales, aussi bien anciennes que modernes, se réduit en fait à quelques mois de stage optionnel. Dans ces conditions, il ne faut pas chercher plus loin le succès actuel des constructeurs et bureaux d'études étrangers ou la prépondérance du personnel hautement qualifié d'origine européenne dans des bureaux d'études français dès qu'il s'agit d'un objet architectural présentant une certaine nouveauté, de caractère même vaguement spatial et plus particulièrement quand il s'agit de structures tendues.

En attendant l'avènement des réformes adéquates dont la nécessité est évidente, l'évolution de la conception des structures métalliques se poursuit, comme cela s'est produit il y a quelque temps dans la construction du béton armé, vers l'adoption des systèmes précontraints. Même utilisés dans les formes constructives classiques, les possibilités de diminuer le poids propre de 50% ou d'augmenter la capacité de portée de 30 à 50%, sont des motivations en soi suffisantes, auxquelles s'ajoute l'avantage de l'extension du champ d'application des aciers de haute résistance, travaillant à un taux de 150 - 180 Kg/mm2, disponibles dès maintenant pour la construction.

En l'occurence, les propriétés de haute résistance de l'acier ne sont réellement effectives que dans les combinaisons structurales où le jeu des forces ne provoque pas d'inversion des contraintes, c'est à dire où les tensions dans les barres de compression ne peuvent se transformer en tractions et vice versa, donc où aucune poussée ne peut se produire dans les tirants. Ce caractère de valeur unique - l'irréversibilité - des forces est la source de la réduction considérable de la section des membrures tendues, donc du poids propre de l'ensemble. A ceci s'ajoute l'apparition des alliages d'aluminium pour la fabrication des barres de compression, en nombre relativement réduit dans les autotendants.

Il se peut qu'actuellement, en période de surproduction de l'acier, ce fait ne soit pas une raison suffisante pour le développement en France des structures précontraintes. Cette objection tombe à la lumière des faits qui montrent l'expansion de ce type de structure - notamment dans les bâtiments dits "high tech". Ceci à tel point qu'on peut affirmer en suivant en cela le Pr N.P. Melnikov, rapporteur de la 3ème Conférence Internationale, que: "Le temps n'est pas loin quand les structures ordinaires en usage seront

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

remplacées par les structures précontraintes qui sont plus adaptables quelle que soit leur utilisation". Selon lui, avant même les problèmes de technologie d'exécution, d'expérimentation et de fabrication des principaux éléments composants et des équipements accessoires, le problème essentiel se trouve dans la forme structurale: "Dans ce domaine il est de la plus grande importance d'élaborer une méthode de conception (design procedure) de systèmes qui soient remarquables par leur surabondance statique multiple et leur non-linéarité géométrique".

Cela signifie qu'au-delà des problèmes de calcul, de contrôle, de sécurité et d'optimisation des éléments individuels et qu'au-delà des problèmes liés à la fabrication, à l'érection ou mise en tension des constructions, la découverte de nouvelles formes structurales reste le domaine d'élection principal de la recherche: "L'utilisation des méthodes de construction précontrainte pose un problème d'élaboration plus poussée d'une théorie des classes de formes précontraintes. S'il est impératif d'étudier la limite d'application des profils creux, des traverses, des formes assemblées, etc., le plus compliqué mais en même temps le plus productif des problèmes est cependant celui de l'élaboration de nouvelles formes structurales en métal que ce soient des systèmes constructifs planaires ou tridimensionnels, ossatures porteuses, réseaux, tours, mâts et ponts".

Les structures autotendantes, dont l'élaboration était commencée par l'auteur depuis la deuxième moitié des années 50, entrent tout à fait dans la ligne de ces idées. Elles ont, outre celles des précontraintes, des propriétés assez extraordinaires: de même que dans une émulsion où les particules solides sont en suspension dans un milieu liquide, dans une structure autotendante les barres rigides flottent, en principe sans contact entre elles, dans un continuum de tirants. A base d'éléments en grande majorité déformables on construit donc une structure indéformable. Le poids des éléments tendus étant quasi négligeable par rapport à celui des comprimés, la construction d'un volume autotendant consomme, en comparaison à toute autre technique connue, considérablement moins de matériaux.

Ces structures, en toute logique, devraient prendre dans les prochains cinquante ans , autant d'importance pour l'architecture que le béton dans les cinquante dernières années.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

LA TECHNIQUE DES STRUCTURES AUTOTENDANTES

DES SYSTEMES MONOLITHIQUES ET ARTICULES

Fondé sur l'utilisation de composants, de pièces détachées puis assemblées aisément tel un jeu de meccano, ce genre de construction est fondamentalement opposé au monolithisme, qui, cependant, règne encore actuellement dans le monde du bâtiment.

Le monolithisme est la conséquence de l'orthogonalisme des formes aussi bien dans le tracé général que dans le profil des structures. Cette évidence était le point de départ des nombreuses études théoriques entreprises par l'auteur en vue de développer des structures constituées de membrures standard, donc de longueur identique, suivant des systèmes spatiaux ou stéréométriques.

Parmi le très grand nombre de ces configurations, connues sinon des constructeurs mais des cristallographes, seuls quelques réseaux sont actuellement utilisés dans le bâtiment. Ces structures peuvent être classées en déformables, strictement indéformables et hyperstatiques de degré déterminable. Si les premières exigent l'emploi de joints soudés et encastrés, les autres sont parfaitement stables avec des joints articulables; leur réalisation avec des joints fixes provoque, au contraire, des moments secondaires non négligeables et même néfastes, sans oublier l'insuffisance des méthodes actuelles pour calculer la répartition des efforts dans une structure complexe à noeuds encastrés.

Evidemment, il y a tout avantage à choisir ces combinaisons à géométrie stable car non seulement une telle structure est assemblable et démontable par des raccords mobiles et par pièces effectivement détachées, mais, une fois l'encastrement éliminé, aucun effort de flexion ni de torsion ne peut plus se produire, seulement les efforts directs de compression ou de traction. de ce fait, la structure devient aussi facilement calculable.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

Un joint articulable, sorte de multi-cardan, tel que nous le proposons, résoud les problèmes d'ajustage en éliminant les découpes compliquées. Il permet également la rencontre des membrures dans leurs axes géométriques - condition idéale pour le calcul. Enfin, c'est en même temps un noeud universel car ses branches étant orientables, il est donc utilisable pratiquement dans tous les réseaux.

Cependant, si parmi ces réseaux on peut trouver nombre de compositions indéformables, la plupart de celles-ci sont constituées de telle manière que les sollicitations externes diverses provoquent dans les membrures des renversements d'efforts. Cela signifie que toutes les membrures doivent pouvoir travailler aussi bien à la compression qu'à la traction, avec tous les inconvénients que cela comporte. Et on sait qu'un élément oblong travaillant à la compression et qui subit donc les effets de flambage, utilise de ce fait une section d'acier, dans certains cas, de plusieurs dizaines de fois plus grande qu'un élément travaillant à la traction.

Or, parmi les combinaisons indéformables il en existe un certain nombre où il ne se produit pas de renversement d'efforts, où quelque soit la direction des sollicitations externes, les efforts internes dans les éléments resteront toujours de même nature, soit compression, soit traction. Cela signifie que les membrures travaillant en permanence à la traction ne doivent plus être dimensionnées pour subir le flambage.

Cette situation ne peut être obtenue qu'en rompant toute continuité entre les éléments travaillant à la compression, lesquels comme mus par une apparente force de lévitation semblent flotter dans l'espace, soutendus toutefois par les éléments de traction.

On imagine l'importance de l'économie de matière réalisable par ces structures privilégiées si on considère que les combinaisons isostatiques de cette espèce se contentent d'un quart de barres de compression, où donc trois membrures sur quatre sont des tirants.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

LES PRINCIPES DE CONSTRUCTION DES AUTOTENDANTS

En principe la structure se compose de deux ou plusieurs solides polyédriques qui peuvent être identiques ou différents. Le rôle de ces polyèdres est comparable à celui des briques ou des moellons qui, assemblés suivant un appreillage adequat, constitueront un ouvrage ou un élément de construction quelconque, mât, nappe, arche, coupole, etc.

Dans ce qui suit, on appellera "equilibrium" les polyèdres particuliers susceptibles de constituer les structures autotendantes, parce qu'il s'agit, en effet, d'un ensemble de vecteurs équilibrés. Les membrures de ces equilibriums sont des barres et des tirants, les barres travaillant à la compression étant isolées entre elles et les tirants travaillant à la traction formant une configuration polyédrique continue.

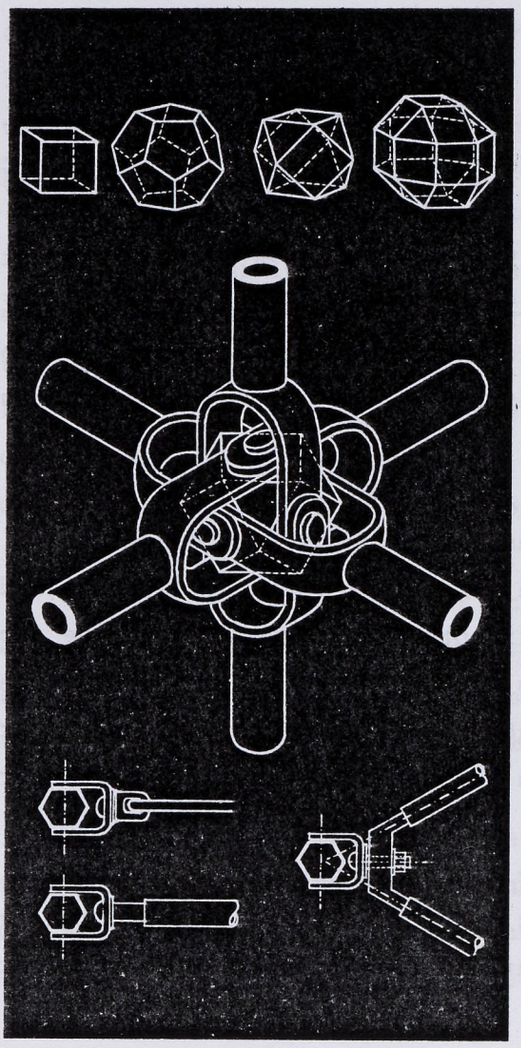
Les avantages de tels ensembles notamment indéformabilité, résistance, légèreté sont connus. Certaines combinaisons primitives étaient utilisées individuellement, tels les signaux du Festival de Londres 1950 et de l'Exposition Universelle de Bruxelles 1958, mais jusqu'à l'aboutissement des présentes études, leur association systématique n'était pas réalisable. Il fallait pour cela créer des equilibriums particuliers pouvant se réunir en combinaison régulière et en même temps une méthode de composition rendant possible leur appareillage en une charpente.

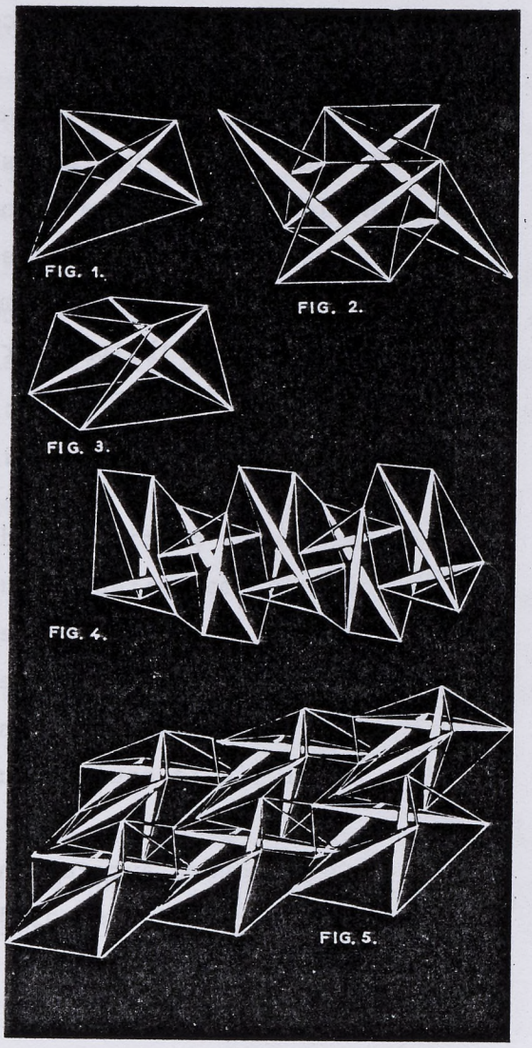
Ce qui est particulier dans les structures autotendantes c'est que les equilibriums élémentaires ont une symétrie rotatoire, les barres étant embauchées dans une configuration de tirants - en forme de pyramide tronquée ou de prisme - déformée dans un sens gauche ou droite lors de la mise en tension. Des equilibriums composites, en général de forme polyédrique, sont obtenus de deux ou plusieurs equilibriums élémentaires imbriqués par interpénétration.

Une structure autotendante est bâtie par la combinaison de plusieurs equilibriums qui sont des solides ayant donc une symétrie rotatoire et dont les arêtes sont constituées de barres et de tirants. Deux equilibriums sont

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

réunis par une maille de jonction commune qui est une face polygonale composée de tirants: base en cas de superposition, face latérale en cas de juxtaposition. Dans un assemblage les noeuds sont situés sur deux ou plusieurs niveaux, où les nappes reliant les noeuds sont composées uniquement de tirants, les liaisons entre ces nappes étant réalisées par des barres et un nombre égal de tirants. Les membrures se joignent uniquement par leurs extrémités dans les noeuds, lesquels reçoivent en principe l'extrémité d'une seule barre. Toutes les membrures sont rigidement écartées et en même temps solidarisées sous l'effet d'une précontrainte qui est réalisée par la mise en tension interne de la configuration des tirants, sans nécessité d'ancrage ou autre transmission d'effort extérieur de même que dans une structure autoportante, d'où notre dénomination - "autotendante".





Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Dans un equilibrium poussées et tractions s'annulent dans un cycle vectoriel fermé. De ce fait, en dehors des réactions provenant du poids propre et du vent, la structure ne transmet ni poussées ni tractions sur le sol. Donc à part une fondation relativement légère, ces structures ne nécessitent ni culées ni ancrage coûteux, contrairement aux structures tendues classiques.

Afin de mieux faire comprendre ces systèmes on décrira ici plusieurs modes de réalisations donnés à titre d'exemple en se référant aux dessins annexes:

- La figure 1 est un equilibrium élémentaire lévogyre, c'est à dire à rotation gauche, construit par trois barres et une configuration de tirants homéomorphe à une pyramide tronquée à base triangulaire. C'est le solide autotendant le plus petit possible ayant un nombre minimal de membrures.

- La figure 2 représente un équilibrium composite obtenu par l'interpénétration complète en position inverse de deux equilibriums décrits dans la précédente figure, l'un lévogyre et l'autre dextrogyre, où les sommets se distribuent sur deux nappes suivant ceux d'un octaèdre étoilé tronqué.

- La figure 3 montre un equilibrium élémentaire lévogyre réalisé par quatre barres et une configuration de tirants homéomorphe à une pyramide tronquée à base carrée.

- La figure 4 présente une structure linéaire composée d'equilibriums à trois barres dont la configuration est homéomorphe à un prisme triangulaire. On voit sur la figure une suite de cinq equilibriums qui sont alternativement lévogyres et dextrogyres, assemblés par des mailles de jonction hexagonales.

- La figure 5 montre un réseau spatial se composant d'equilibriums élémentaires carrés semblables à ceux de la figure 3 qui sont tous identiques et appareillés ensemble par leurs mailles latérales.

Dans tous les ensembles représentés par ces figures, les barres et les tirants peuvent naturellement être en matériaux divers: métal, béton, bois, etc. et les liaisons peuvent être établies de manière connue.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

LES SOLIDES AUTOTENDANTS ELEMENTAIRES

Dans un equilibrium élémentaire, la déformation homéomorphe se caractérise par une tendance des sommets de la face supérieure à se déplacer par rapport à la base suivant une trajectoire hélicoïdale et par un gauchissement des faces triangulaires latérales. Le déplacement dans le sens des aiguilles d'une montre est dextrogyre, dans le sens inverse lévogyre. Dans un équilibrium composite dérivé de l'interpénétration de solides d'orientation opposée, cette action peut-être compensée en partie ou annulée. C'est le cas d'un equilibrium inactif ou "racémique" par analogie avec la chimie.

En principe, à chaque sommet d'un equilibrium il y a la rencontre d'une seule barre de compression et d'au moins deux tirants. La barre prend toujours une position diagonale sur une maille latérale quadrangulaire. En cas d'équilibrium composite, les barres relient les mêmes sommets qu'elles reliaient à l'origine dans les corps élémentaires.

Entre les mailles supérieures et inférieures, le nombre des tirants est au moins égal au nombre des barres, mais on peut en rajouter et réaliser toutes les liaisons possibles entre les sommets et arriver à la triangulation latérale complète de la configuration des tirants. L'ensemble saturé devient un deltoèdre polygonal ou antiprisme. Un tel equilibrium a des liaisons saturées. Il y a évidemment des états intermédiaires.

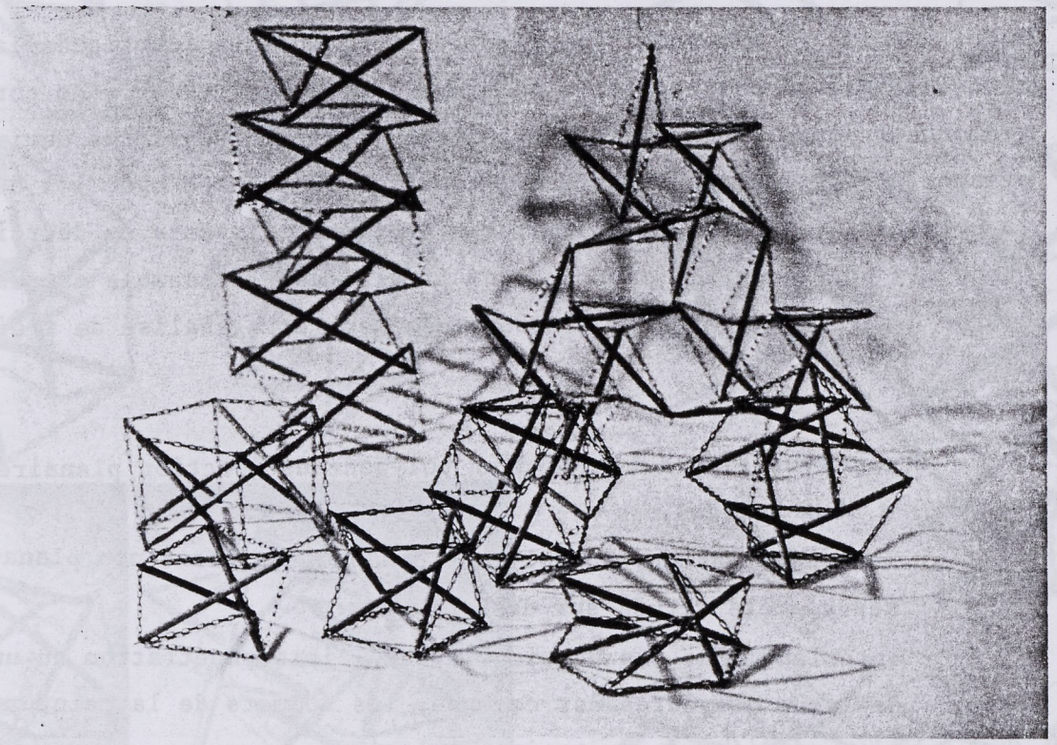
Par une recherche systématique s'étendant sur plusieurs années nous avons élaborer une cinquantaine de solides élémentaires. Ils composent en quelque sorte l'alphabet et les syllabes les plus courantes à l'aide desquels on peut construire des réseaux plus complexes.

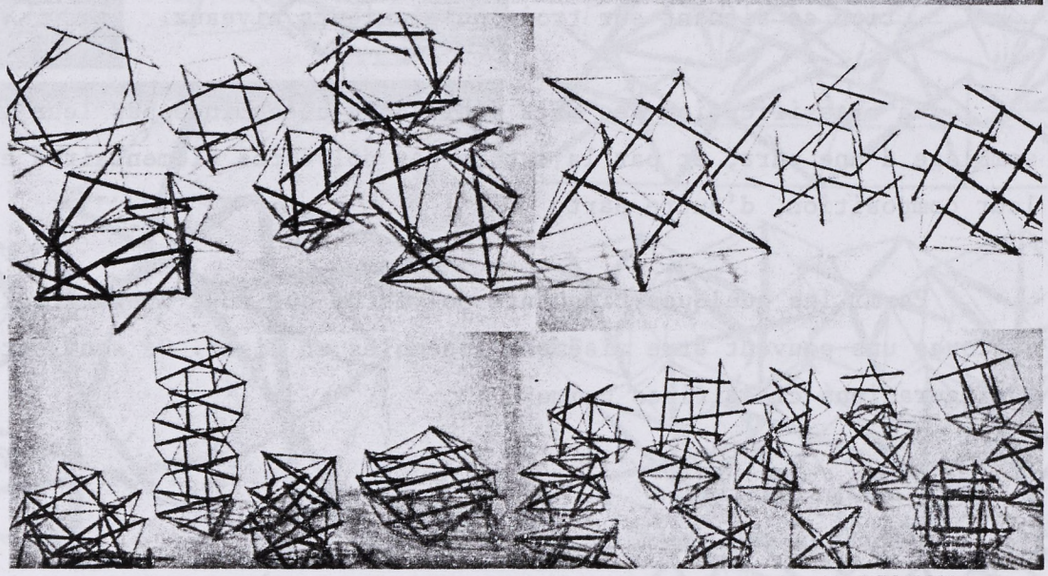
Ces combinaisons élémentaires peuvent être classées en deux catégories: les structures helicoïdales avec axe de symétrie rotatoire unique et les polyédriques, régulières et semirégulières, ayant plusieurs axes de symétrie. Les catégories sont les suivantes:

- Les archetypes antiprismatiques élémentaires dérivés des roues de bicyclette polygonales et passant par des toupies autotendantes, il n'existe qu'une demi-douzaine de structures de cette classe, parmi lesquelles seules trois sont réellement simples: celles qui ont la forme antiprismatique à base triangulaire, carrée et pentagonale.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

- Les solides réguliers et semiréguliers: parmi les 18 polyèdres de cette classe, la construction de deux - le tétraèdre et le cube - est impossible sous forme autotendante pure, c'est à dire sans contact entre les barres de compression. Deux autres ne sont réalisables qu'autour d'un axe préférentiel, tandis que les 14 structures restantes ont été toutes réalisées, certaines même avec des solutions variantes. Ce qui donne finalement pour résultat la création de plus d'une vingtaine de configurations.





Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

LES MATS ET CHARPENTES LINEAIRES

Pour obtenir une structure oblongue, il faut joindre en chaîne des solides par leurs bases, à l'aide de mailles polygonales dont le nombre des sommets est égal à la somme des sommets des deux faces réunies. Le polygone de jonction se substitue à ces deux faces dont il est au fond la résultante. Les polygones de jonction qui constituent une sorte de ceinture sont plans en principe, mais peuvent aussi subir une déformation sous l'effet des forces de liaison reliant les nappes.

En cas de superposition répétitive de solides identiques la structure sera lévogyre ou dextrogyre, tandis que l'emploi alternatif de corps enantiomorphes donne un ensemble " racémique". Partant des corps dérivés du prisme, on obtient une structure de section constante; avec les dérivés de la pyramide tronquée, des ensembles de section croissante ou décroissante. Quand les polygones de jonction sont parallèles, l'ensemble est droit, courbe dans les autres cas. L'assemblage peut être réalisé de trois manières par:

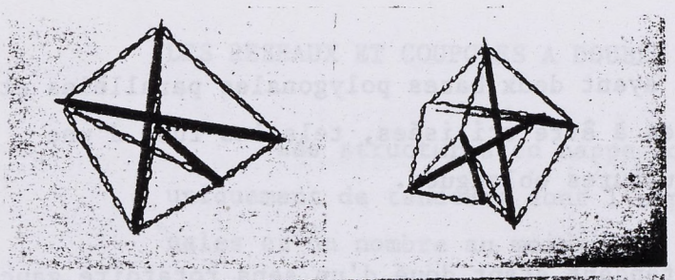
- superposition à l'aide d'un polygone de jonction planaire commun à deux solides.
- Interpénétration, le polygone de jonction étant non planaire, avec ses sommets situés sur deux niveaux.
- interlacement, cas particulier de l'interpénétration où une partie des deux polyèdres est commune, les sommets de la ceinture de jonction se situant sur trois ou plusieurs niveaux.

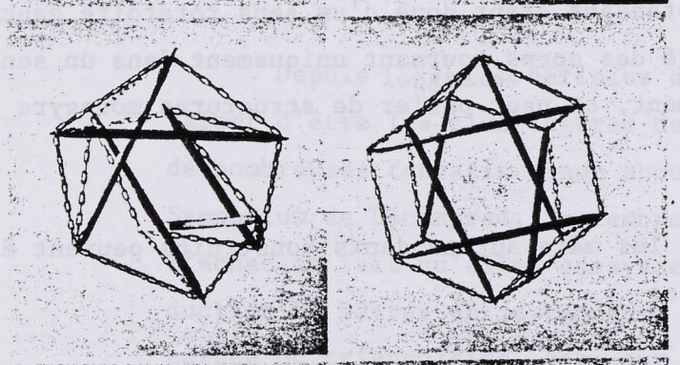
La classification des mâts était donc déterminée par leur mode d'assemblage d'une part, et par la nature des polyèdres élémentaires entrant dans leur composition, d'autre part.

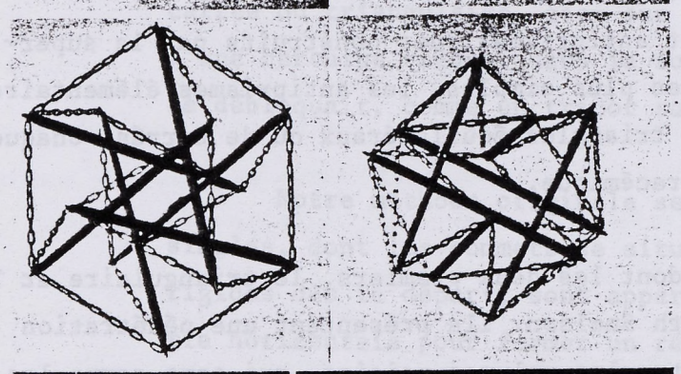
Parmi les quelques cinquante polyèdres que nous avons étudiés, seuls quelques uns peuvent être aisément assemblés en ligne. Ce sont notamment les configurations classifiées comme:

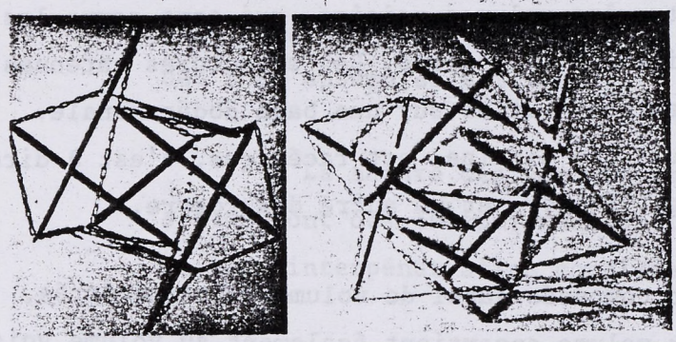
- antiprismatiques
- anneaux antipyramidaux
- prismes tronqués

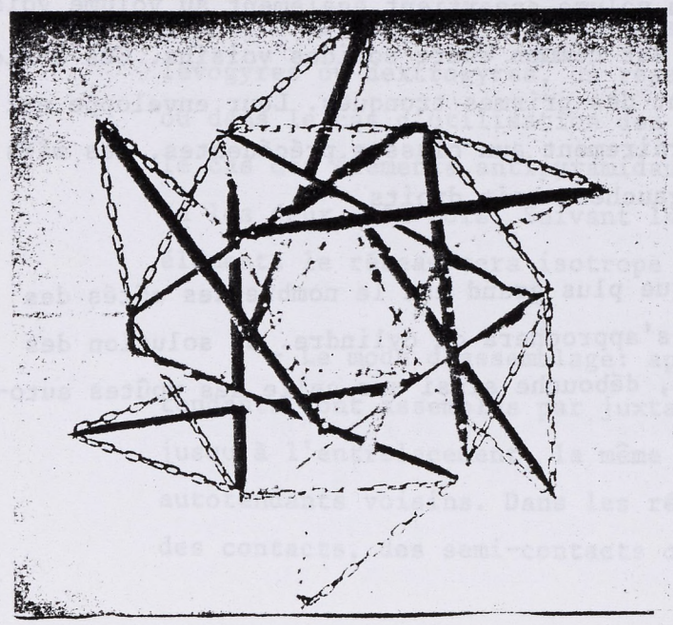
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

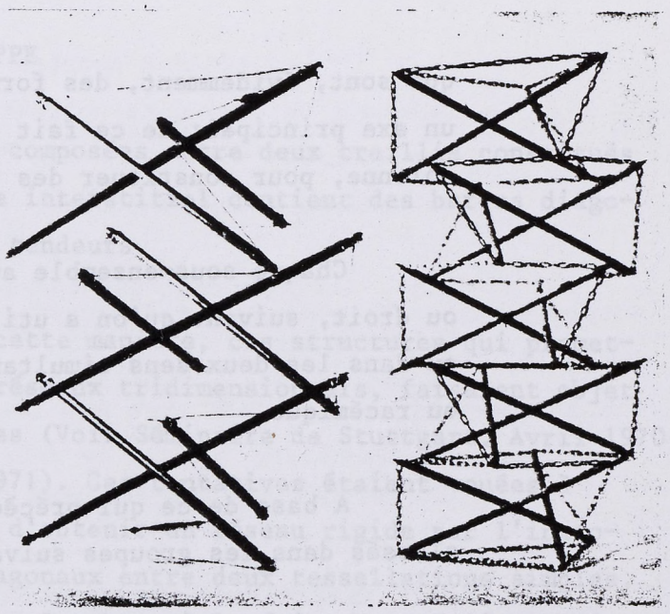


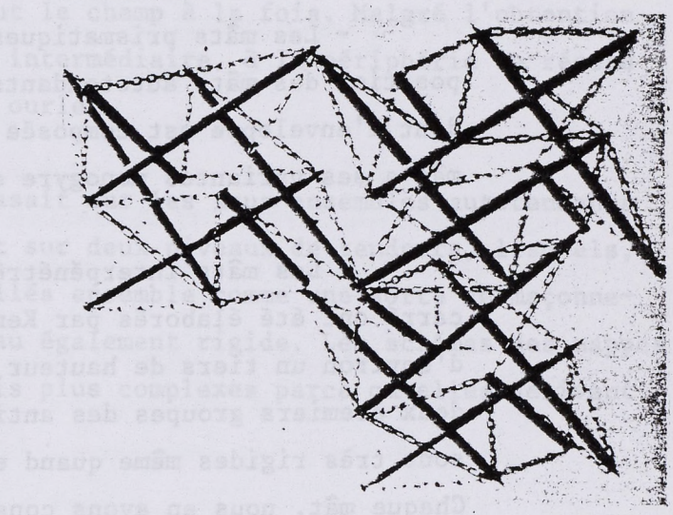


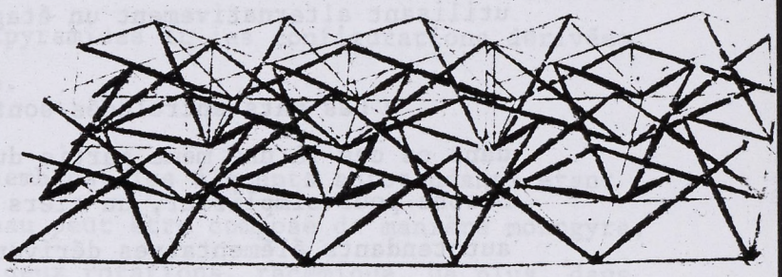


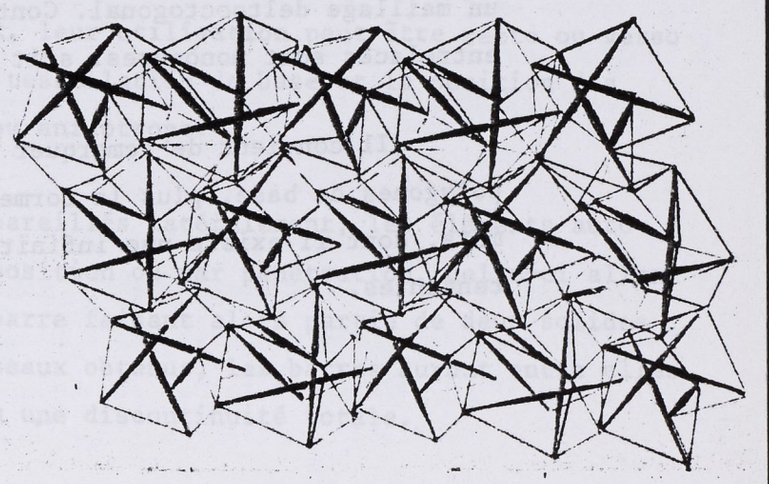












Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

qui sont, évidemment, des formes ayant deux bases polygonales parallèles et un axe principal; de ce fait aptes à être utilisées, tels les fûts d'une colonne, pour constituer des structures oblongues.

Chaque sous-ensemble autotendant étant doué d'un sens rotatoire gauche ou droit, suivant qu'on a utilisé des corps tournant uniquement dans un sens ou dans les deux sens simultanément, on peut parler de structures monogyre ou racémique.

A base de ce qui précède, les mâts autotendants construits peuvent être classés dans les groupes suivants:

- Les mâts prismatiques et antiprismatiques construits par la superposition des mâts autotendants les plus simples, les antiprismes élémentaires dont l'enveloppe est composée de triangles équilatéraux ou de carrés. Chaque mât a ses variantes monogyre et racémique.

- Les mâts interpénétrés dont les deux premiers, le triangulaire et le carré ont été élaborés par Kenneth Snelson. Ils présentent une pénétration d'environ un tiers de hauteur entre les volumes voisins, qui sont comme les deux premiers groupes des antiprismes élémentaires. Les structures obtenues sont très rigides même quand elles sont bâties sur une base dodécagonale. Chaque mât, nous en avons construit une dizaine, est racémique, c'est à dire, utilisant alternativement un étage lévogyre et un autre dextrogyre.

- Les mâts entrelacés sont composés aussi de volumes interpénétrés, dans ce cas là une même partie du volume appartient également au volume voisin. Disons pour simplifier, un tiers est commun entre solides voisins. Ces solides autotendants élémentaires dérivent des prismes tronqués. Leur enveloppe est un maillage deltooctogonal. Contrairement aux classes précédentes, les mâts entrelacés sont monogyres: soit gauches, soit droits.

Il convient de remarquer que plus grand est le nombre des côtés des polygones de base, plus la forme s'approchera du cylindre. La solution des mâts, dont il existe une infinité, débouche ainsi sur celle des voûtes autotendantes.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

LES RESEAUX ET COUPOLES A DOUBLE NAPPE

Les structures en nappe sont composées entre deux treillis constitués uniquement de tendeurs dont l'espace interstitiel contient des barres diagonales et un nombre au moins égal de tendeurs.

Depuis longtemps définies de cette manière, ces structures qui promettaient d'être les plus légères des réseaux tridimensionnels, faisaient objet de nombreuses tentatives non abouties (Voir Séminaire de Stuttgart, Avril 1970, Symposium de Léningrad, Septembre 1971). Ces tentatives étaient vouées à l'échec du fait qu'elles essayaient d'obtenir un réseau rigide par l'introduction de barres et de tendeurs diagonaux entre deux tessellations simples, carrée ou triangulaire, ceci sur tout le champ à la fois. Malgré l'obtention d'une certaine raideur dans la zone intermédiaire, à la périphérie le réseau se débloquait, comme un tricot sans ourlet.

Notre méthode originale se basait sur les sous ensembles autotendants simples, dont les sommets se situent sur deux niveaux de tendeurs, lesquels, rigides dès le départ, sont appareillés ensemble comme une sorte de maçonnerie horizontale pour former un réseau également rigide. Les schémas des nappes sont là aussi des tessellations, mais plus complexes parce qu'elles dérivent des sous ensembles utilisés.

- La nature des sous ensembles: les autotendants élémentaires utilisables sont des antiprismes, antipyramides et les configurations dérivées de leur interpénétration complète.

- La position des sous ensembles: les éléments autotendants étant lévogyres ou dextrogyres, un réseau peut être composé de manière monogyre, ou dans le cas d'utilisation des deux rotations, racémique. De plus, dans le cas des éléments antipyramidaux, leur utilisation peut être recto ou verso ou les deux à la fois. Suivant la tessellation de base et la position des éléments le réseau sera isotrope ou anisotrope.

- Le mode d'assemblage: appareillés latéralement, les éléments autotendants sont assemblés par juxtaposition ou par pénétration, celle-ci allant jusqu'à l'entrelacement, la même barre faisant alors partie de deux solides autotendants voisins. Dans les réseaux obtenus, les barres auront entre elles des contacts, des semi-contacts ou une discontinuité totale.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

- Les réseaux courbes sont composés à base d'une tessellation cylindrique, conique ou de polyèdres réguliers et composites. De ces derniers - une centaine - dérivent les "hyperpolyèdres autotendants" composant autant de sphères à double couche.

En combinant des corps dérivés du prisme, on obtient un réseau sous forme de nappe de hauteur constante; avec des dérivés de la pyramide tronquée on obtient des ensembles de surface gauche, courbe ou d'un galbe quelconque.

LES EMPILEMENTS AUTOTENDANTS COMPOSES EN ESPACE CONTINU

Ces structures quasi cristallographiques sont construites à base de polyèdres et hyperpolyèdres autotendants appareillés suivant les empilements spatiaux ou leurs dérivés par élision, rotation... Par ailleurs, les mêmes critères que dans le cas des réseaux président à la composition, définissant le degré de continuité ou discontinuité des barres suivant le polyèdre autotendant, l'empilement spatial de base et le mode d'assemblage choisis. Les structures obtenues sont classées en deux grands groupes.

- Les empilements avec contact ou semi contact entre les barres sont obtenus par la juxtaposition, par faces ou arêtes, de polyèdres suivant la stéréotomie des empilements compacts, élagués, lâches ou concentriques.

- Les empilements sans contact entre les barres sont obtenus par un mode d'assemblage indirect: juxtaposition ou interpénétration avec dérotation; entrelacement avec une barre commune entre les polyèdres; entrelacement avec un sous ensemble commun entre hyperpolyèdres.

Ces structures discontinues sont, évidemment, les plus intéressantes par leur extraordinaire légèreté et la facilité de leur assemblage du point de vue technologique.

La plupart des quelques trente continuums que nous avons élaborés et modélisés - comme d'ailleurs toutes les autres configurations des précédentes catégories - présentent grâce à leur solidarisation multidirectionnelle une remarquable indéformabilité.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

POSSIBILITES D'APPLICATION DES AUTOTENDANTS

Les structures autotendantes peuvent être utilisées dans pratiquement tous les domaines de la construction, qu'elles soient bâties au sol, flottant sur les eaux fluviales ou maritimes et même sous-marines, et également dans les espaces non gravitationnels. On peut en établir une énumération sans aucun caractère limitatif, suivant l'ordre de complexité:

- Des solides élémentaires et les assemblages simples directement dérivés donnent des volumes à usage d'habitation ou autres fonctions entrant dans un espace simple, dont les ossatures peuvent être recouvertes par des parois tendues, planes ou de surfaces minima. Les parois tendues peuvent être rigidifiées par la projection d'un liant durcissable; dans ce cas, l'ossature autotendante est réutilisable. Dans la construction mécanique certains ensembles peuvent également constituer des rotors géants pour générateurs d'énergie éolienne.

- Des réseaux planaires à double nappe pouvant enjamber des espaces considérables sans appui intermédiaire, ou directement posés sur le sol et à une plus grande échelle couvriront des étendues extensibles à souhait pour former des bâtiments industriels ou des serres agricoles, ou des ombrières notamment pour les zones arides à irrigation artificielle; des radeaux maritimes de grande dimension pour transport ou plate-forme de forage.

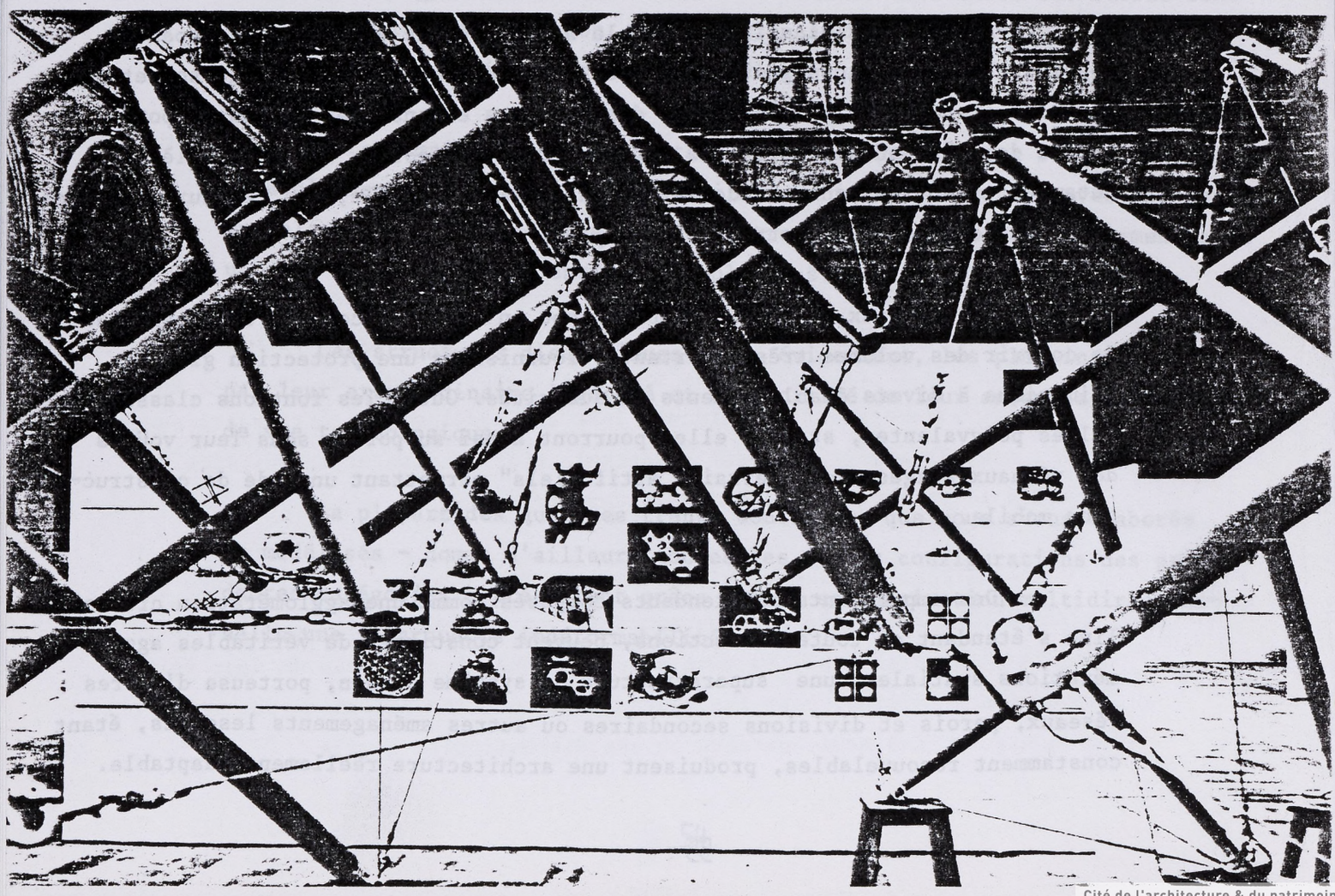
- Des réseaux courbes à double nappe en forme de coupole sont capables de couvrir des volumes très importants, fournissant une protection globale climatique à divers établissements ou activités. Outre les fontions classiques: salles polyvalentes, stades, elles pourront aussi supporter sous leur voûtes des réseaux étagés, des "terrains artificiels" permettant un mode de construction mobile.

- Des empilements autotendants composés comme une agglomération cristalline s'étendant en toutes directions, peuvent constituer de véritables agglomérations spatiales, une superstructure de système urbain, porteuse d'autres réseaux, parois et divisions secondaires ou autres aménagements lesquels, étant constamment renouvelables, produisent une architecture réellement adaptable.

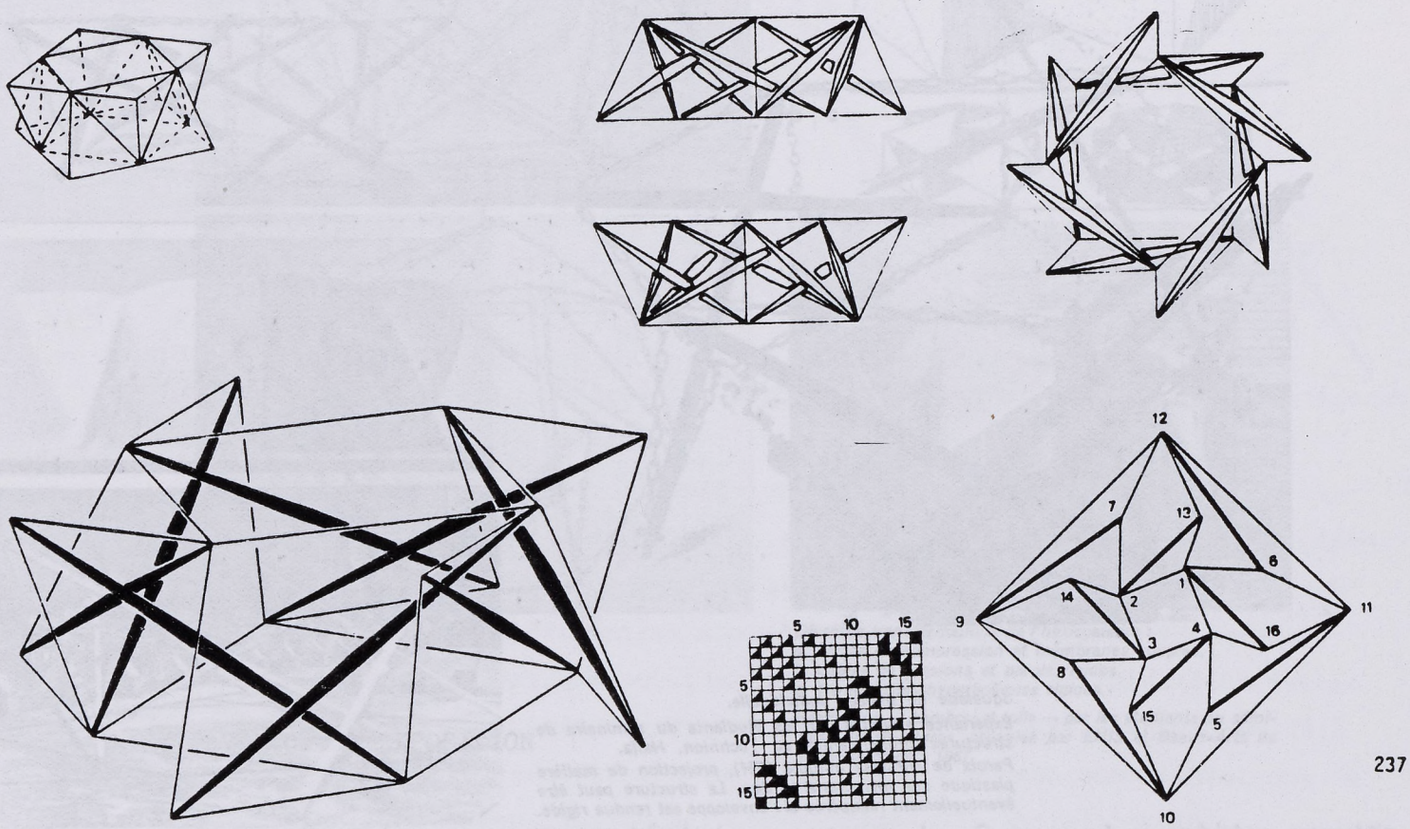
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

HABITACLES ET ESPACES POLYVALENTS

La distinction entre squelette et remplissage est poussée jusqu'à ses extrêmes conséquences dans la technique de construction autotendante. Dans les cas les plus simples, ce principe se traduit par le système porteur composé de barres et de tirants, d'une part, et l'enveloppe tendue souple ou rigide, d'autre part. Dans les cas plus complexes et généralement à une échelle plus importante d'utilisation des structures, le concept de remplissage peut s'étendre au delà des parois délimitant le volume, englobant, par exemple, des planchers suspendus, des grappes de volumes, des systèmes porteurs secondaires ou tout autres équipements accrochés aux points fixes constitués par les sommets. La composition structurale et donc architecturale peut se hiérarchiser grâce à la graduation des éléments constituants, semblable à la subordination systématique des organes constructifs qui régissait jadis l'ordre ogival. Dans le cas de réalisations de grande dimension la hiérarchisation structurale et en même temps stéréotomique est, et reste toujours, le seul moyen de garder l'échelle humaine d'un édifice.



Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

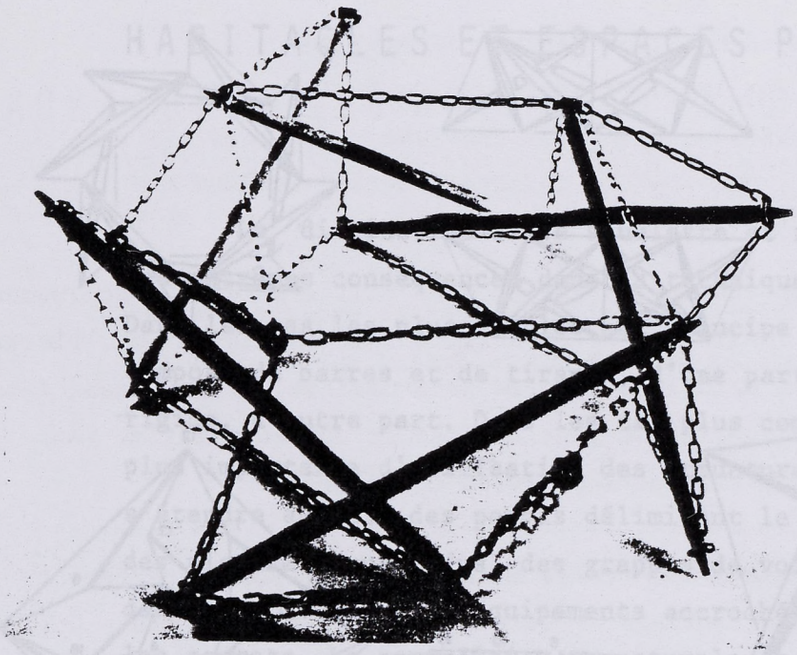


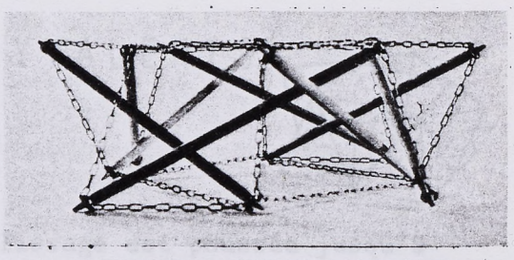
237

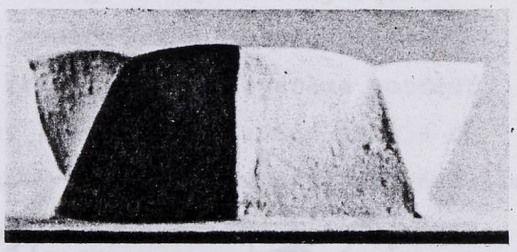
ABRIS D'URGENCE

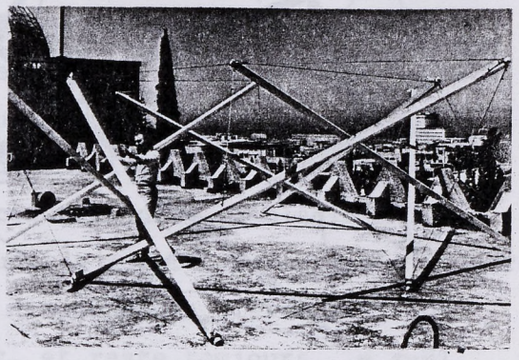
Pour construire des volumes simples et de relativement faible dimension, à usage d'habitation, ou autres, on peut utiliser directement des formes élémentaires antiprismatiques ou leurs dérivées par interpénétration. En vue d'élaborer, par exemple, un type d'abri d'urgence très économique, mais qui pourrait également remplir les fonctions de logement de vacances, hangar de stockage agricole, etc. une forme appelée "interpénétration carrée, composée de huit barres et de vingt quatre tirants a été choisie. Un modèle grandeur était construit la première fois en 1963 par un groupe d'étudiants de l'ENSBA et un autre en 1971 par ceux du Technion. Ce dernier avait environ 7 mètres de côté et 50 m2 de surface habitable. Pour l'enveloppe extérieure composée de huit PH identiques,outre la solution de voiles souples, on préconisait une variante avec parois rigides. Cette technique, consistait à tendre un grillage métallique ou en matière plastique entre les tirants, puis à projeter soit un mortier de ciment ou de plâtre armé ou encore un isolant expansé sur les surfaces tendues. Après le durcissement, ces surfaces gauches à double courbure étant devenues autoportantes, les barres de la charpente peuvent être démontées et réutilisées.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE







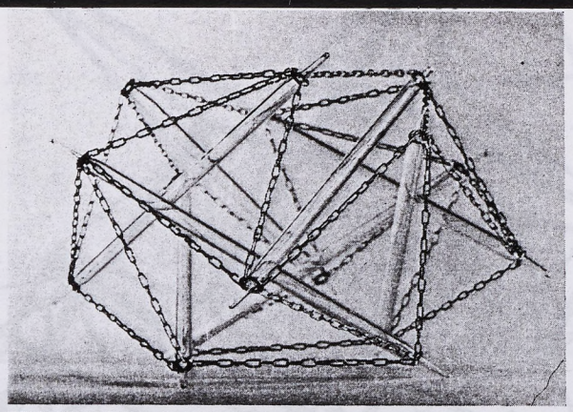


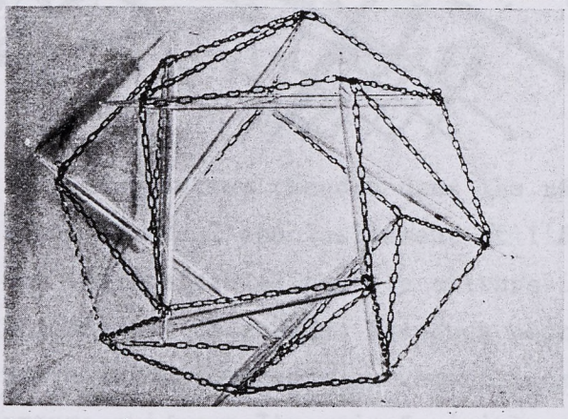
Squelette de maison individuelle.

Expérience exécutée par les étudiants du séminaire de structures autotendantes au Technion, Haïfa.

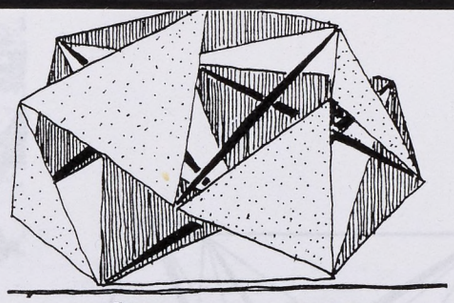
Parois de surfaces minima (PH), projection de matière plastique sur membrane tendue. La structure peut être éventuellement récupérée si l'enveloppe est rendue rigide.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE





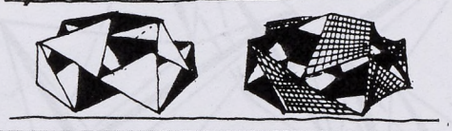
5

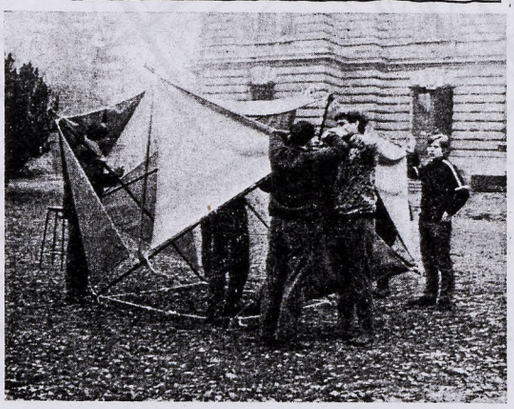


a

b | c

6



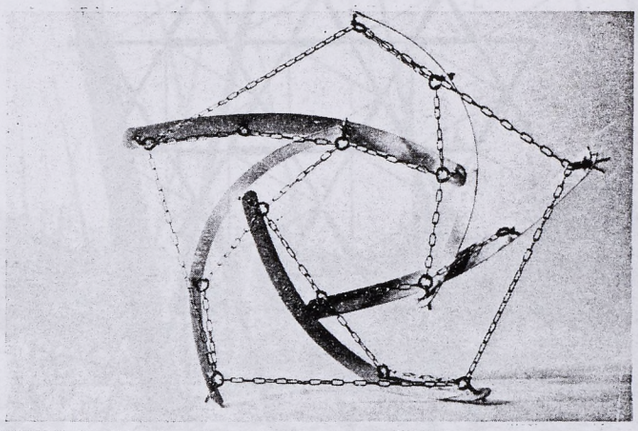


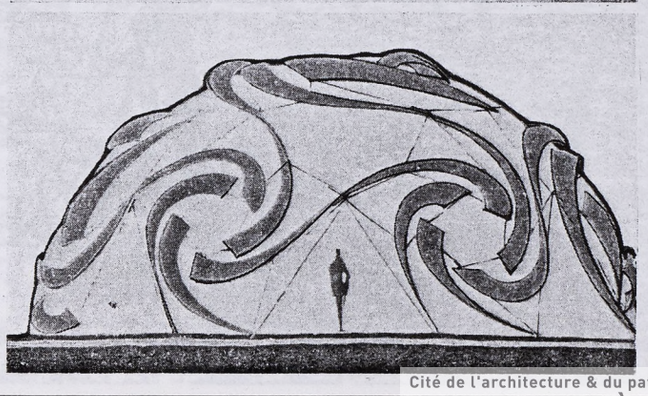
Diverses transformations de l'hexicosièdre :
a. barres de compression et membranes souples.
b. câbles de tensions et parois rigides.
c. Paraboloïdes-hyperboliques rigides.

Réalisation — bambou et toile — par les étudiants du séminaire de structures, organisé par ENIS et Beaux-Arts de Strasbourg, déc. 1967.

PAVILLONS D'EXPOSITION

Certaines structures bâties en anneau, de même que les solides appelés "polyèdres mixtes" ont une enveloppe composées à la fois de surfaces gauches et de polyèdres réguliers. Dans ces compositions relativement simples, les surfaces planes se prêtent à la création d'écrans, d'ouverture et de passages. Lors d'un séminaire à Strasbourg, en 1967, une structure de cette catégorie, appelée "hexicosièdre" était modélisée selon les diverses techniques de réalisation possibles en vue de la construction d'un pavillon d'exposition itinérante.



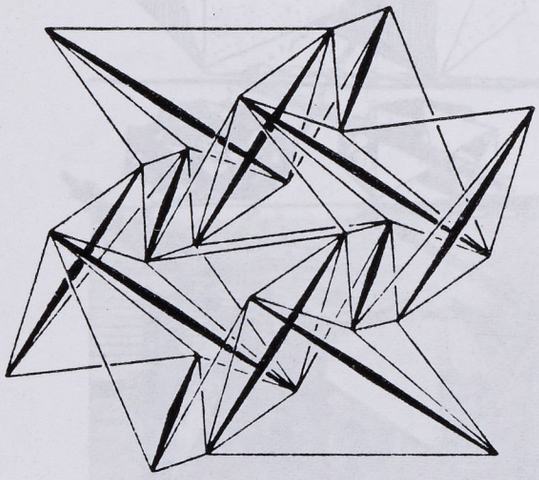


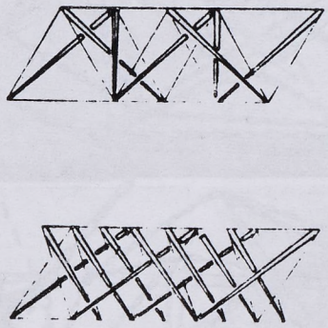
Un sous-ensemble auto-tendant ressorts-tirants ; vue de la maquette.

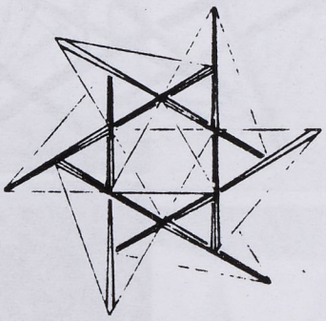
Schéma de montage — homéographie — d'une coupole composée de lames de flexion et de câbles de tension.

Vue d'une coupole incassable, type « Prague », composée de lames flexibles à courbures spatiales. Couverture : membrane souple.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE



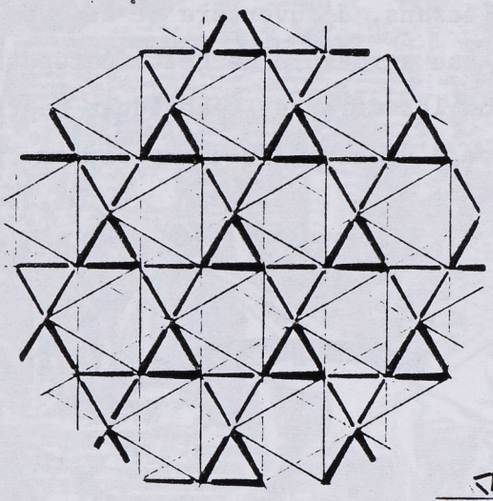


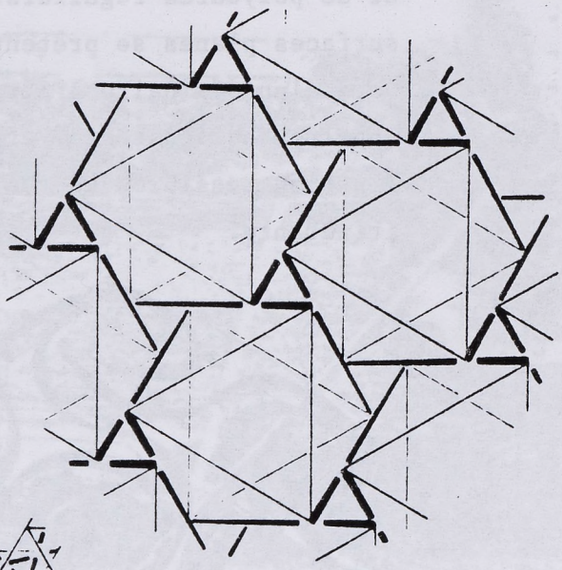


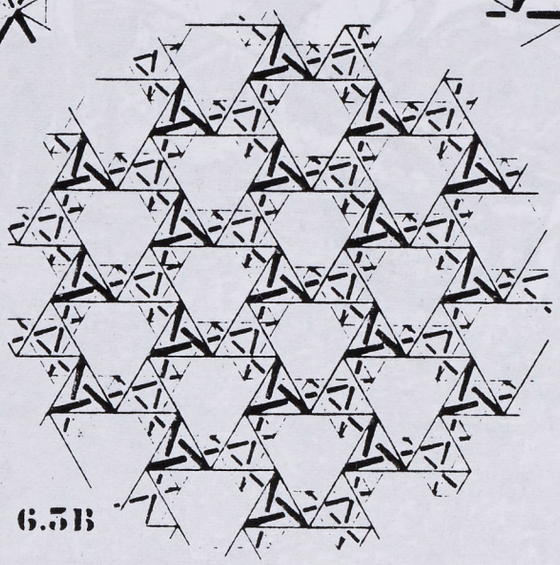
316

RESEAUX EXTENSIBLES

Le type de réseau présenté ici, à titre d'exemple, est une structure pliable: son mécanisme permet de la refermer en un faisceau ou de la déployer progressivement en une nappe de plus en plus lache. Tout en étant le réseau tridimensionnel le plus efficace pour enjamber des portées dans ses phases intermédiaires d'ouverture, posé au sol et complètement déployé il constitue l'ossature de support la plus économique.







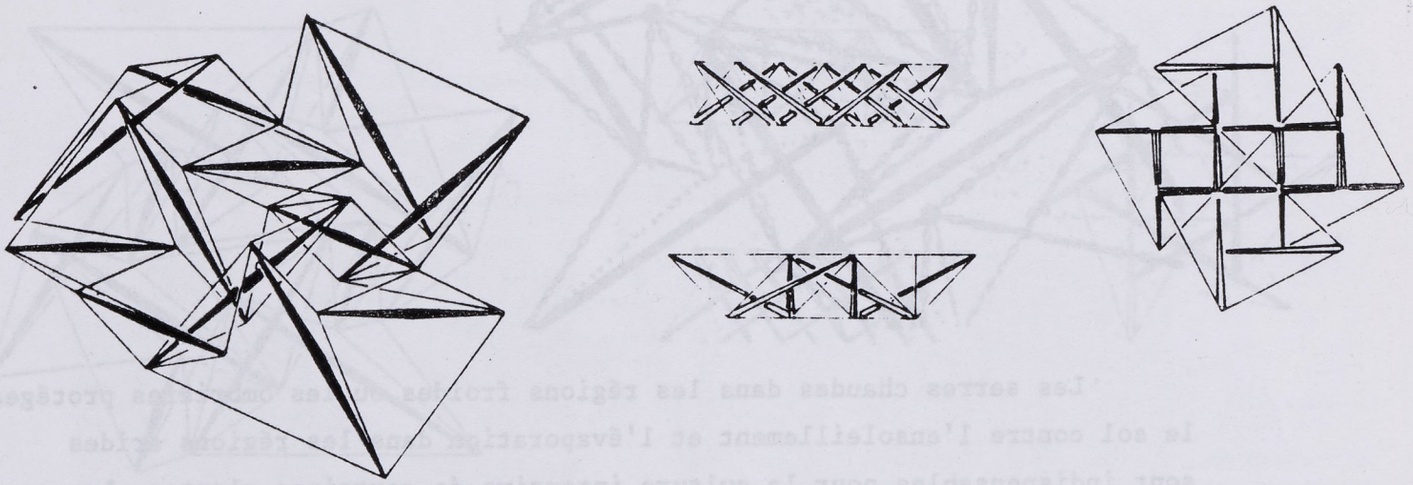
RESEAUX ENTRELACES 6.5B

317

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Les serres chaudes dans les régions froides ou les ombrières protégeant le sol contre l'ensoleillement et l'évaporation dans les régions arides sont indispensables pour la culture intensive de certaines plantes. Le conditionnement de grandes étendues peut augmenter la durée des saisons et même rendre arables des sols autrement inexploitables. L'établissement d'une couverture qui peut être transparente ou semi opaque, étanche ou respirante, selon l'exigence climatique peut être aisément résolu à l'aide d'un réseau autotendant à double nappe. Semblable trame est, d'ailleurs, employée déjà dans l'agriculture comme système de tuteur pour soutenir des plantations de houblon dans la région alsacienne.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

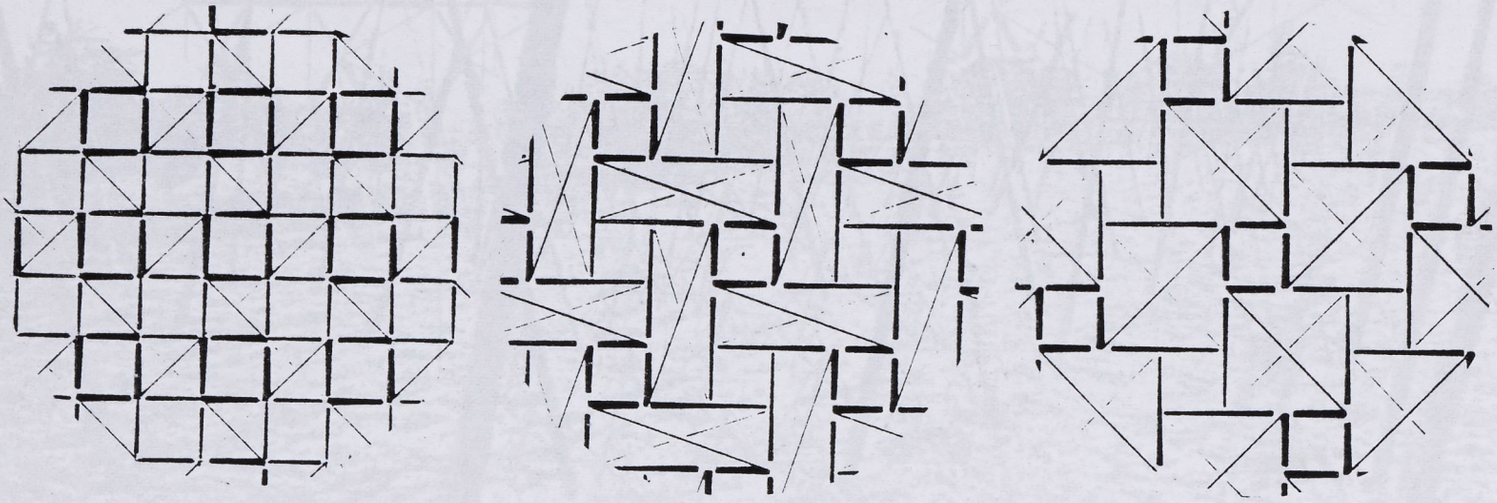


324

TRAME HABITABLE

Parmi les réseaux autotendants à double couche établis sur une trame automorphe, certaines configurations "entrelacées" à maillons rectangulaires se prêtent particulièrement à la construction d'ossatures d'un seul niveau à usage d'habitations, en bande ou proliférant en étendue.

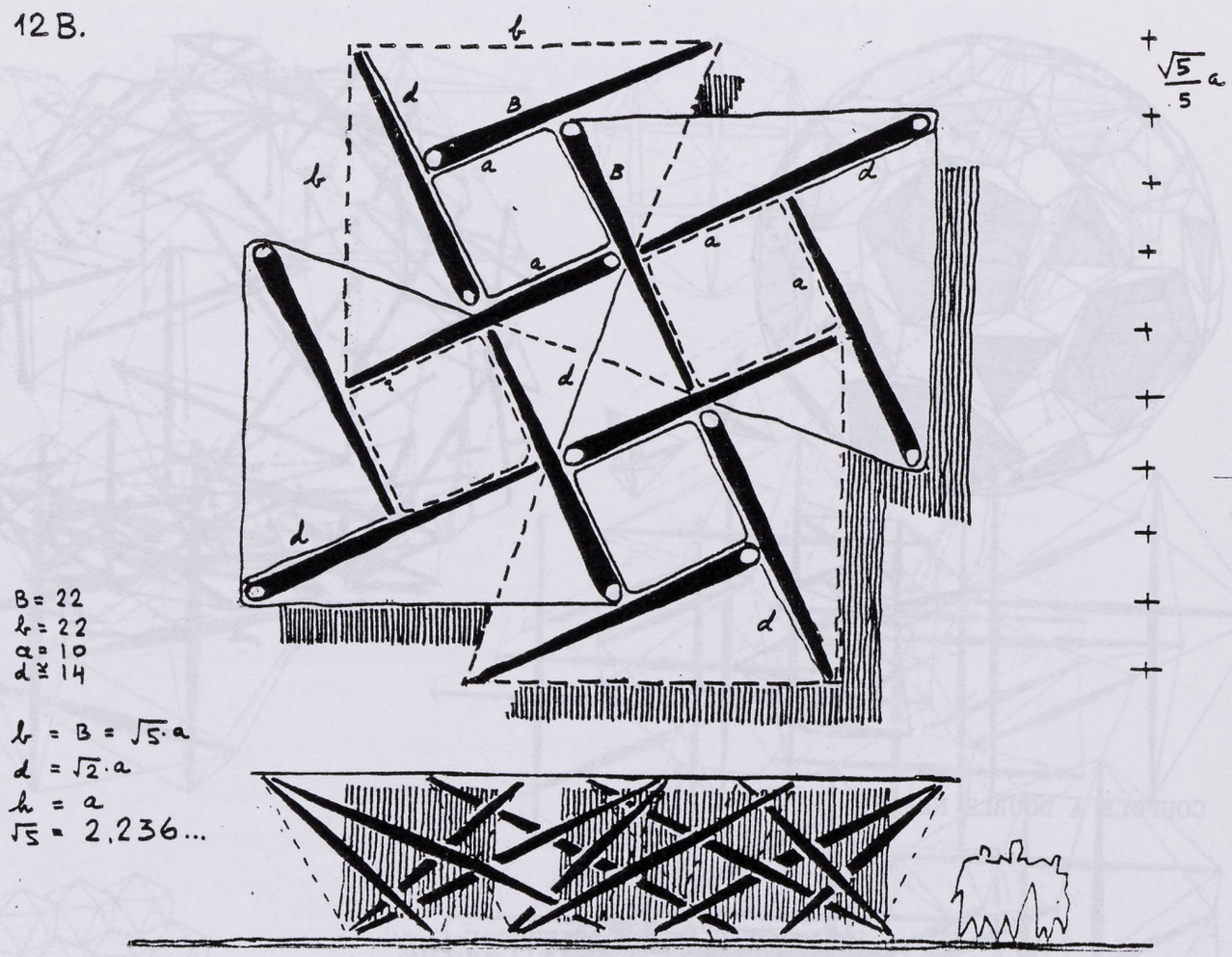
Cette catégorie d'ossature a l'avantage de définir des volumes cubiques conventionnels - sans aucun obstacle traversant leur espace interne - tout en restant indéformables et facilement exécutables. Le réseau le plus simple est composé de mailles cubiques uniformes sur un plan en damier; les autres de cases de différentes dimensions de plan carré ou rectangulaire, cette diversité de formes permettant une plus grande souplesse et variété d'aménagement: patios, grandes salles, cours.



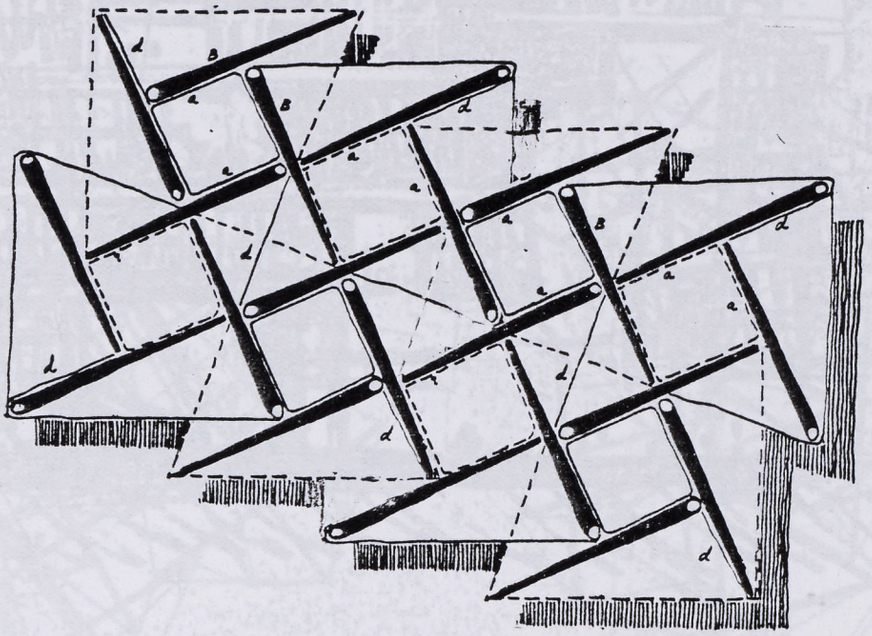
RESEAUX ENTRELACES 4.4B

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

12 B.

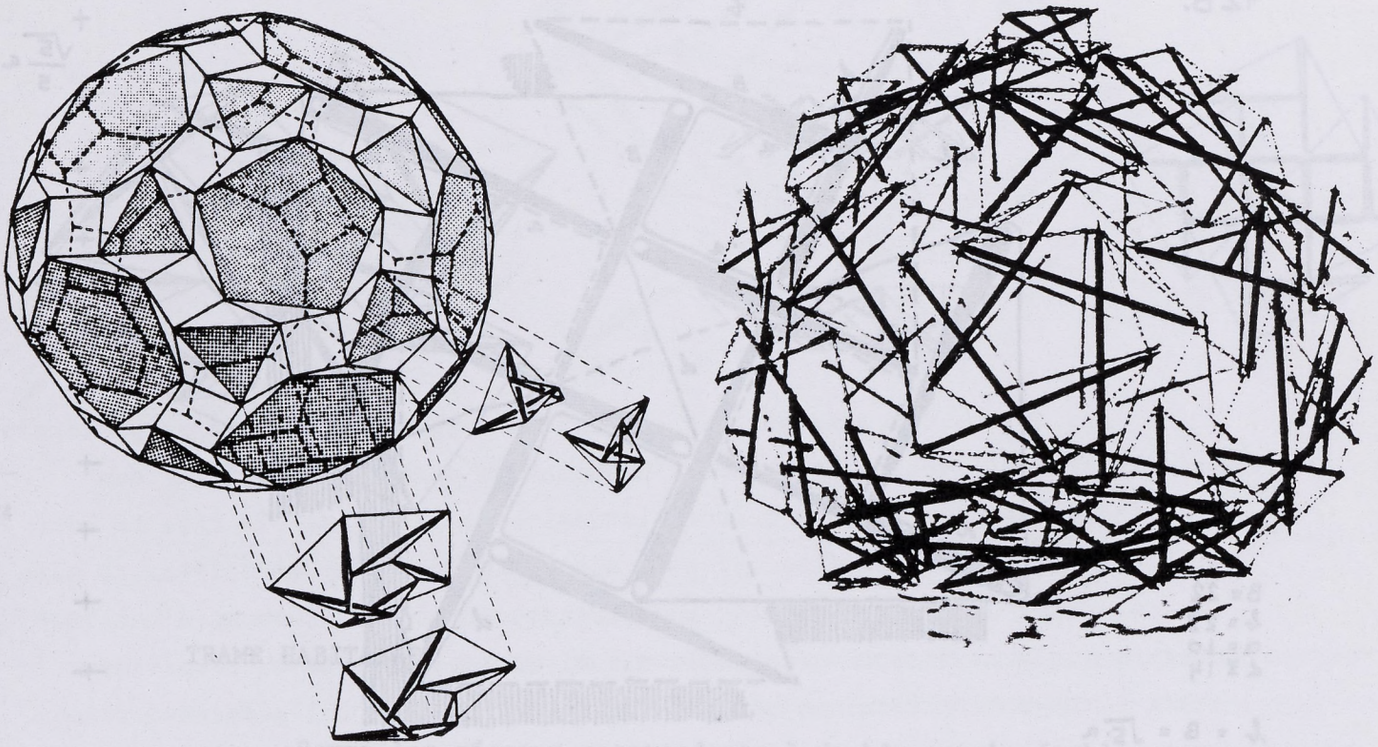


L'unité statique minimale est constructible de 12 barres de compression et de 36 tirants, définissant par la création de sommets stables des volumes cubiques d'auvents triangulaires. Dans un processus de croissance, l'adjonction d'une seule barre à l'unité de base est suffisante pour créer un volume cubique nouveau!

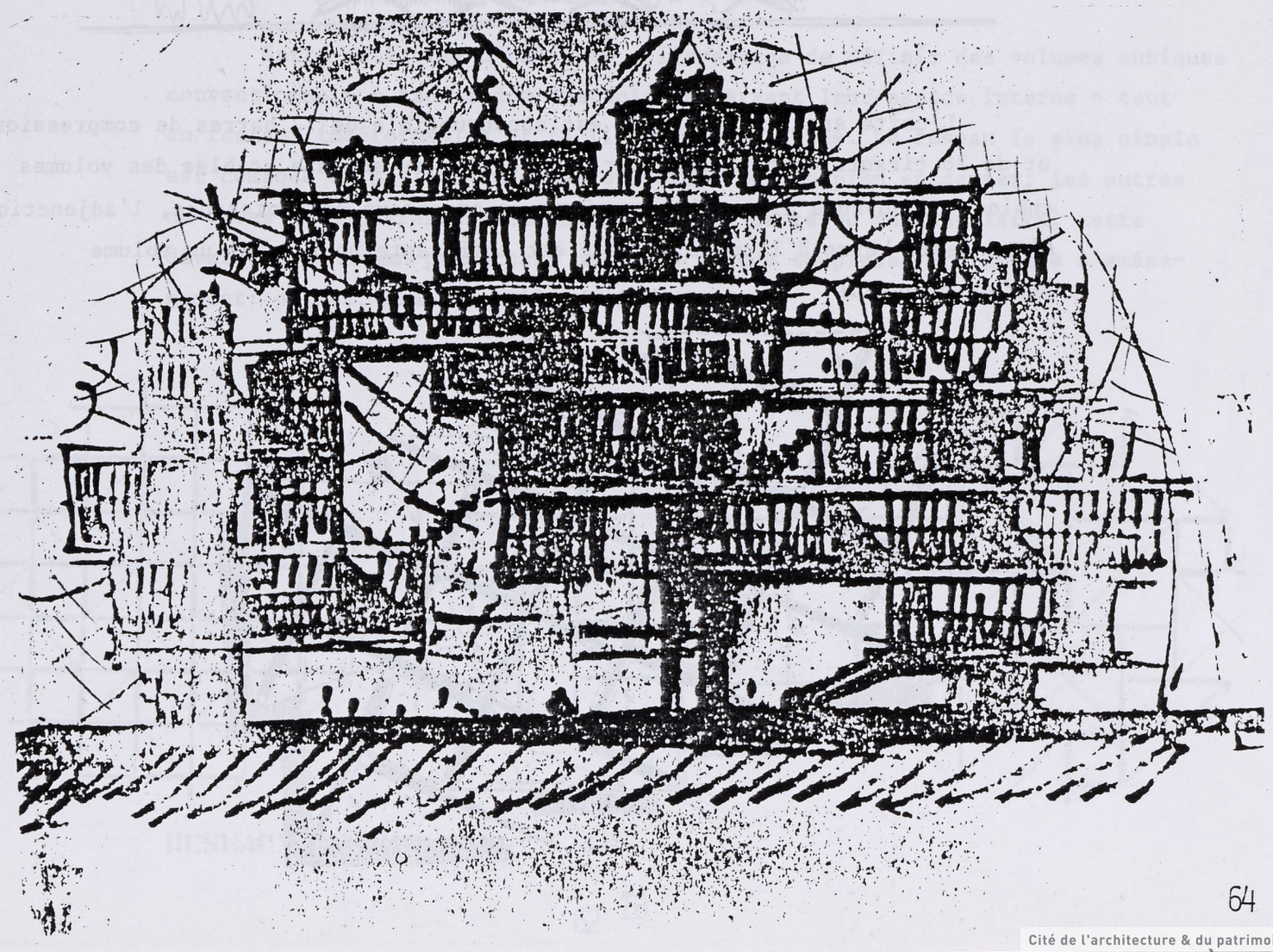


Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

HY. GRAND RHOMBICOSIDODECA

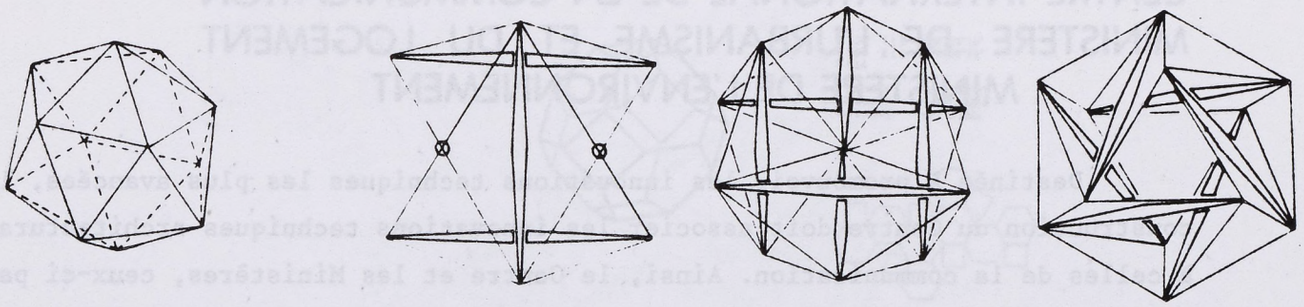


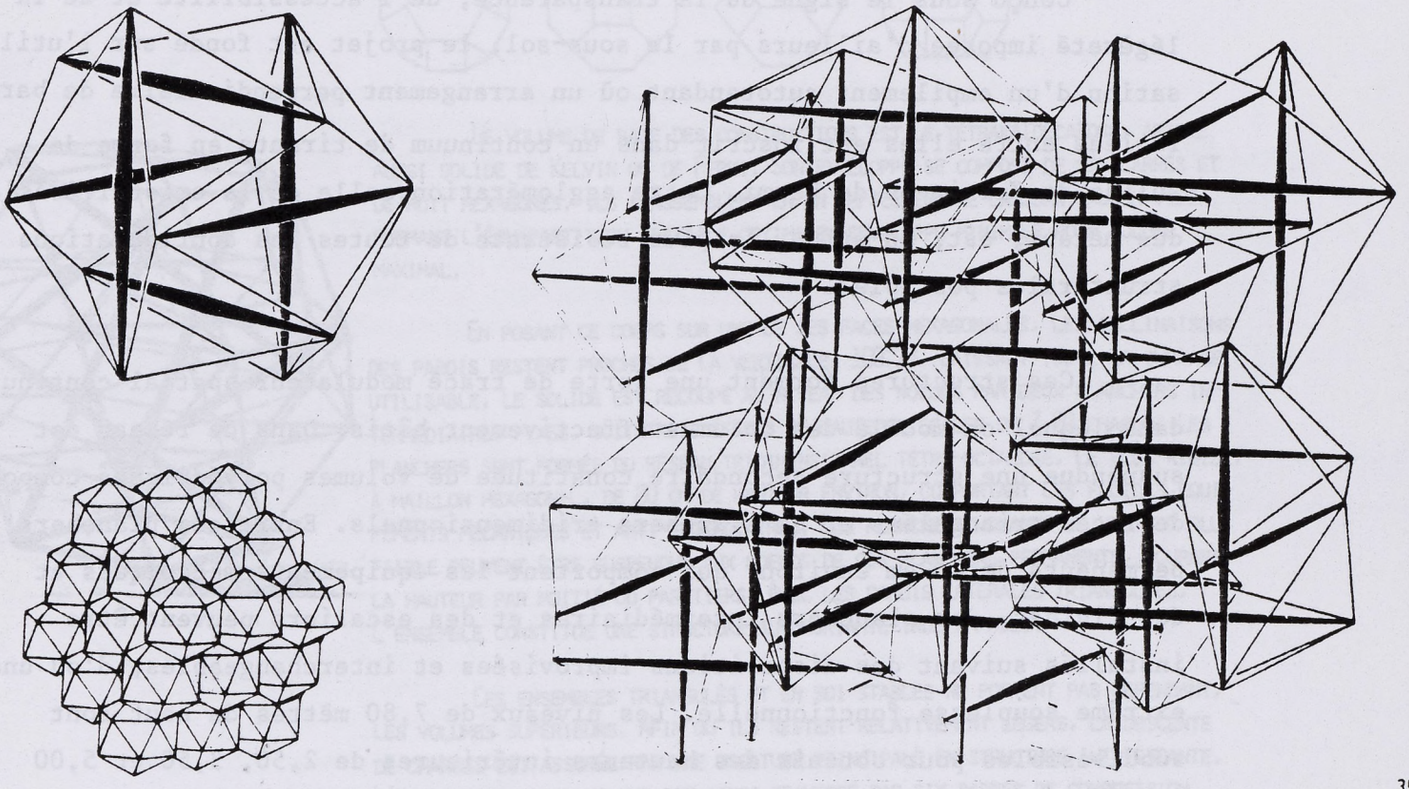
COUPOLE A DOUBLE NAPPE



Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

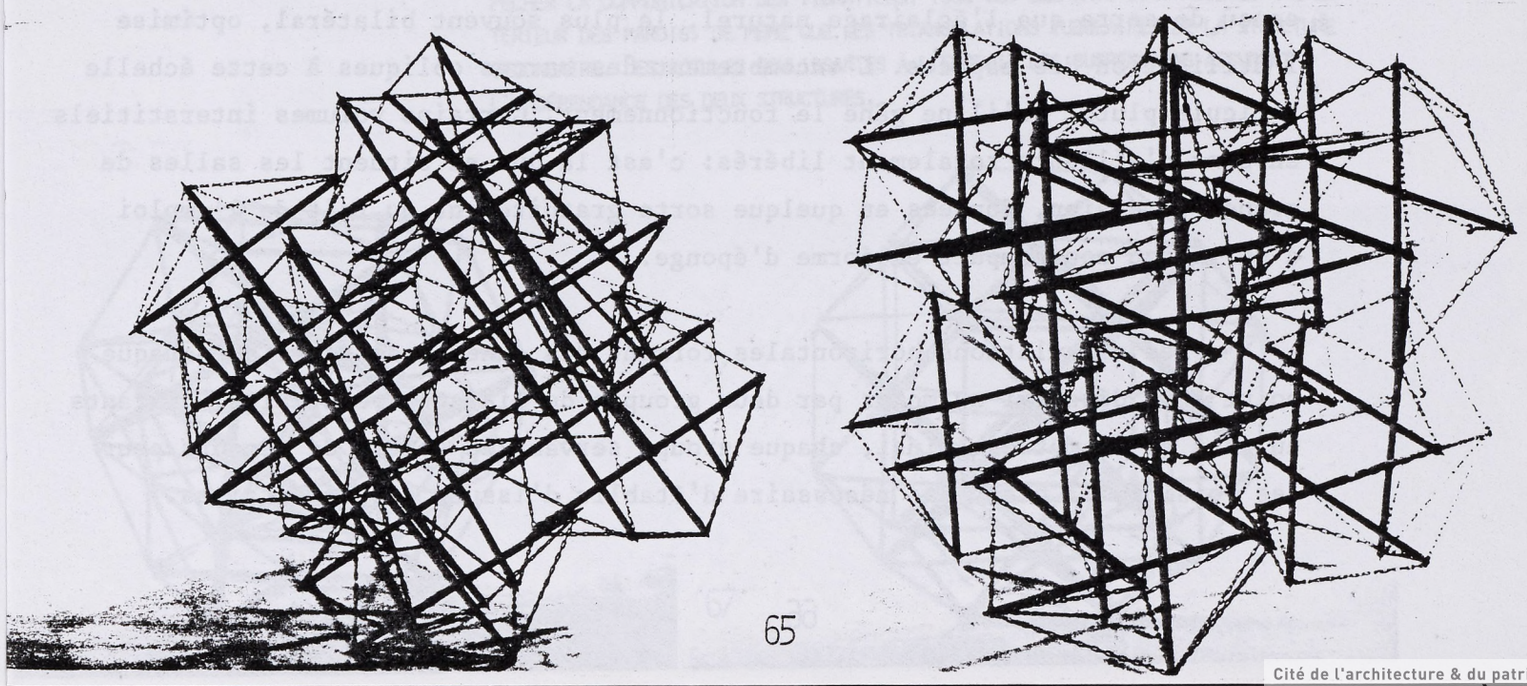
ICOSAEDRE **55555**





351

ICOSA ORTHOGONAL OSSATURE SPATIALE



Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

CENTRE INTERNATIONAL DE LA COMMUNICATION MINISTERE DE L'URBANISME ET DU LOGEMENT MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT

Destinée à promouvoir les innovations techniques les plus avancées, la construction du Centre doit associer les innovations techniques architecturales à celles de la communication. Ainsi, le Centre et les Ministères, ceux-ci par destination, contribueront au mieux à la diffusion des idées architecturales.

Conçu sous le signe de la transparence, de l'accessibilité et de la légèreté imposée d'ailleurs par le sous-sol, le projet est fondé sur l'utilisation d'un empilement autotendant où un arrangement perpendiculaire de barres isolées entre elles est inscrit dans un continuum de tirants en forme de solide de Kelvin ou de Fermi. Cette agglomération,celle de la cristallisation des métaux, est, en effet, la plus résistante de toutes les configurations structurales possibles.

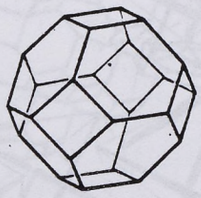
Ces structures forment une sorte de tracé modulateur spatial continu dans lequel on modèle des volumes effectivement bâtis. Dans ce réseau est suspendue une structure secondaire constituée de volumes polyédriques composée de faces triangulées et de planchers tridimensionnels. Entre ces planchers permanents de 80 cm environ, qui comportent les équipements mécaniques et des fluides, des planchers intermédiaires et des escaliers peuvent être installés suivant des dispositions improvisées et interchangeables, d'où une extrême souplesse fonctionnelle. Les niveaux de 7,80 mètres de haut sont subdivisibles pour obtenir des hauteurs intérieures de 2,50, 3,50 et 5,00 mètres environ.

La dimension maximale de ces volumes étant 28,50 mètres, le plan est conçu de sorte que l'éclairage naturel, le plus souvent bilatéral, optimise l'utilisation des espaces. L'encombrement des barres obliques à cette échelle articule plutôt qu'il ne gêne le fonctionnement. Certains volumes interstitiels en sont d'ailleurs totalement libérés: c'est là que se situent les salles de grande dimension, données en quelque sorte gratuitement du fait de l'emploi d'un réseau non compact en forme d'éponge.

Les circulations horizontales forment des anneaux de sorte que chaque point soit désservi au moins par deux groupes de liaisons verticales, distants au plus de 20 mètres. Ainsi, chaque groupe servant de sortie de secours pour les voisins, il n'est pas nécessaire d'établir d'issues supplémentaires.

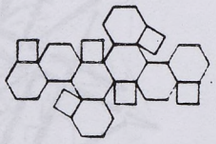
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

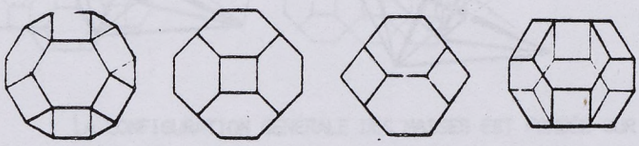
TETRAKAIDECAEDRE 466

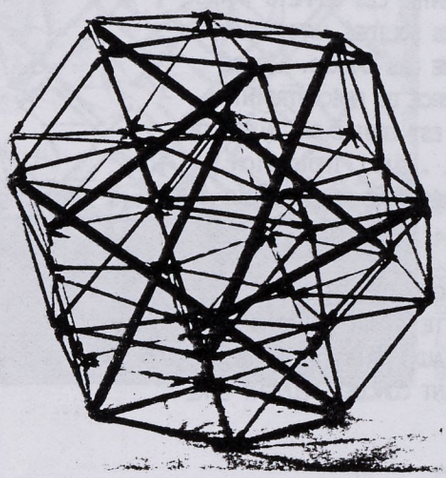


S	24	4 | 6	4-6	125°16'
A	36	6 | 8		109°28'
F	14			

V	111.314	Δ	36°52'
r1	0.9487	a	0.632rm
rc	1.0541	rm	1.582a



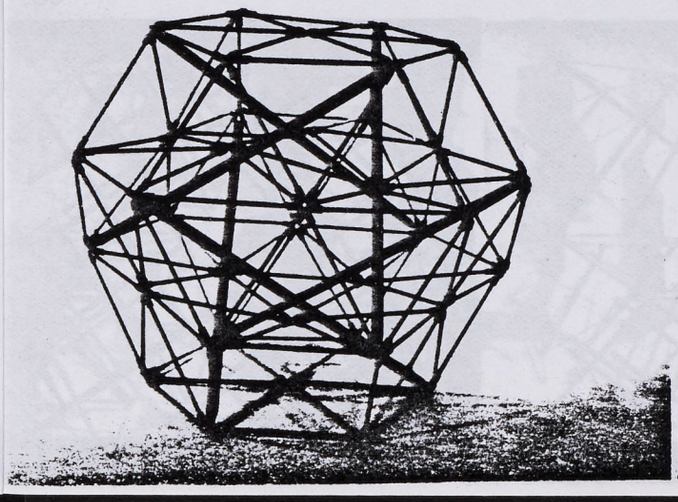


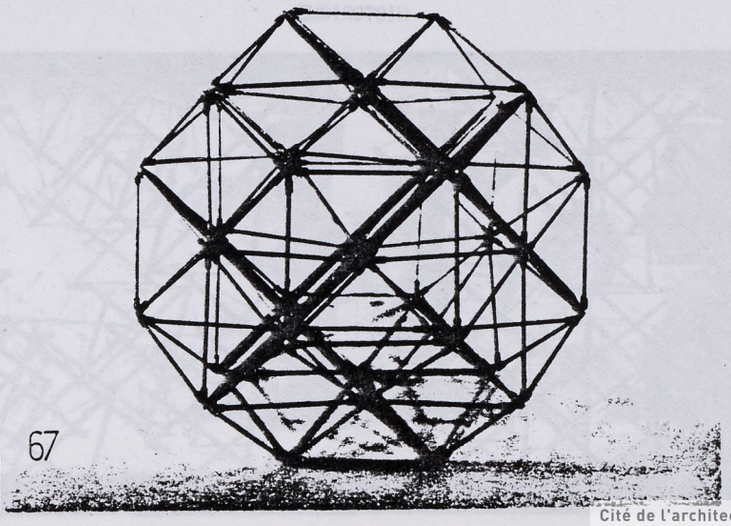


Le volume de base des constructions est le tétrakaïdécaèdre, appelé aussi solide de Kelvin ou de Fermi. Son enveloppe se compose de six carrés et de huit hexagones. Ils s'assemblent en un empilement ne laissant aucun vide, formant l'équipartition spatiale optimale: enveloppe minimale pour volume maximal.

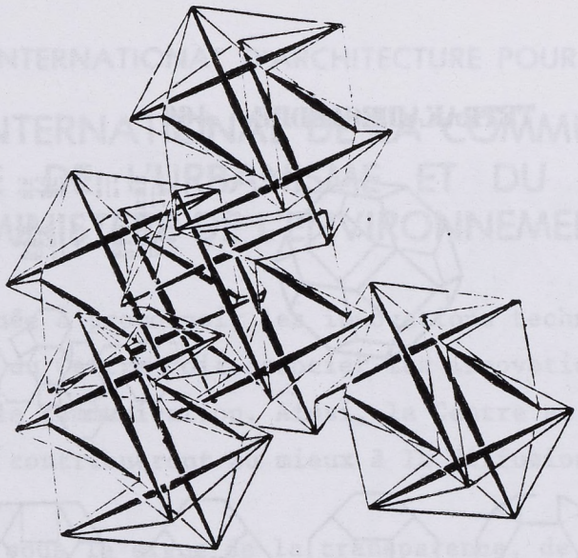
En posant ce corps sur une de ses faces hexagonales, les inclinaisons des parois restent proches de la verticale, 109°28, laissant toute la surface utilisable. Le solide est recoupé au niveau des noeuds par deux planchers intermédiaires fixes, soit trois étages de hauteurs égales de 7,80 chacun. Les planchers sont formés du réseau tridimensionnel tétra-octaèdre, le plus rigide, à maillon hexagonal, de 80 cm de hauteur environ, comportant les fluides, équipements mécaniques et anti-incendiaires. Des planchers volants de hauteur plus faible peuvent être suspendus aux noeuds de ces planchers permanents, coupant la hauteur par moitié ou par tiers. Avec les parois latérales triangulées, l'ensemble constitue une structure autoportante indéformable.

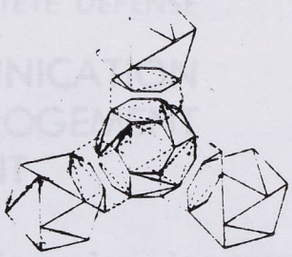
Ces ensembles triangulés et en soi stables ne portent pas cependant, les volumes supérieurs. Afin qu'ils restent relativement légers, la descente de charges est assurée par une ossature principale en structure autotendante. L'espace de chaque volume est ainsi traversé par six barres de compression, les tendeurs étant situés dans le plan des parois. Ces barres, ou mâts de charge, ont environ 27 mètres de logueur et environ 65 cm de diamètre. Les tirants de 16,50 mètres sont des tiges d'acier munies d'amortisseurs afin d'empêcher la communication des vibrations. Tous ces éléments sont rejetés à l'extérieur des parois, de même que les triangulations tubulaires de la structure secondaire. Des rotules coulissantes à l'endroit des suspensions assurent l'indépendance des deux structures.

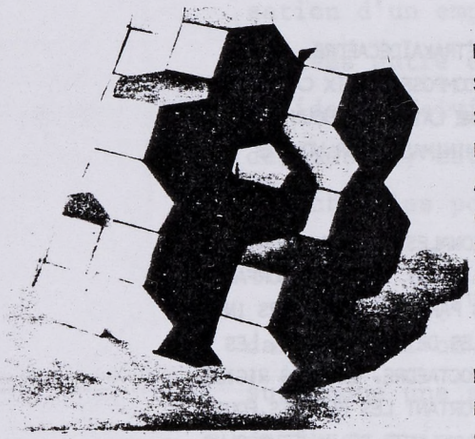




Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE





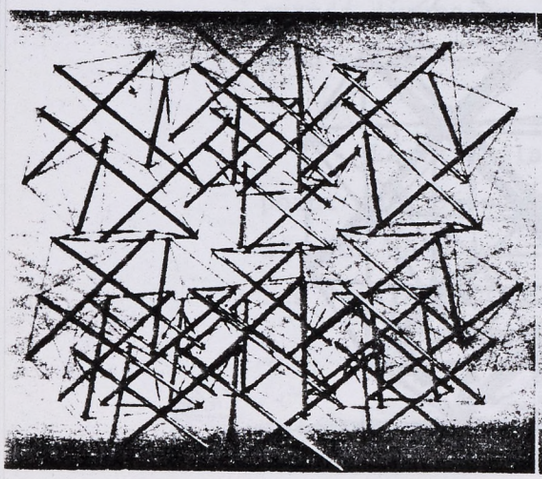


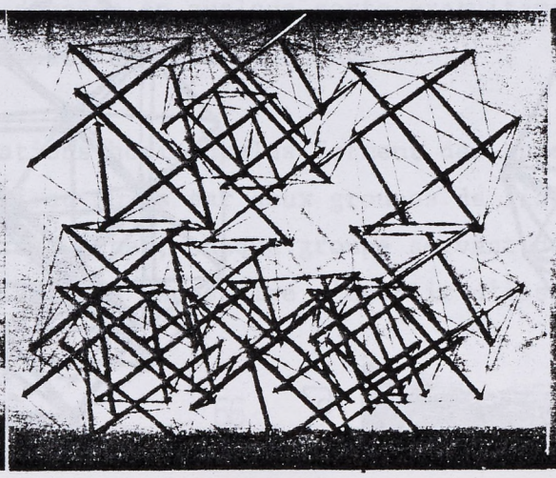
POUR OBTENIR UN RÉSEAU S'ÉTENDANT DANS LESPACE, ON JOINT PLUSIEURS ÉQUILIBRIUMS PAR LEURS FACES LATÉRALES, SANS CONTACT ENTRE LES SOMMETS TRAVERSÉS PAR LES BARRES, DE SORTE QUE LES LIAISONS ENTRE LES SOLIDES AUTOTENDANTS SE RÉALISENT EXCLUSIVEMENT PAR LES TIRANTS TENDUS ENTRE LES BARRES. L'INDÉFORMABILITÉ DE LA CONFIGURATION EST ASSURÉE PAR UNE FORCE DE PRÉCONTRAINTE APPLIQUÉE À L'AIDE DES RIDOIRS DE RÉGLAGE. LE SYSTÈME EST ÉQUIPÉ DE JAUGES DE CONTRAINTE-TÉMOIN, ÉVENTUELLEMENT RELIÉES À UN CENTRAL , SUR L'INDICATION DUQUEL LES TENSIONS SERONT, LE CAS ÉCHÉANT, RÉÉQUILIBRÉES. CE RÉGLAGE PEUT ÊTRE FAIT PAR UN DISPOSITIF AUTOMATIQUE.

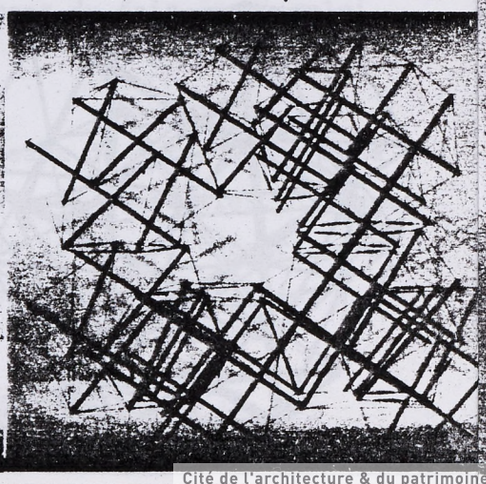
LES ACCESSOIRES MÉCANIQUES, MANILLES, ACCROCHAGES, LES ACCASTILLAGES ET DES ÉLINGUES DE MÊME QUE LES MÂTS DE CHARGES DE CETTE DIMENSION ENVIRON EXISTENT POUR LA CONSTRUCTION DES BÂTIMENTS - LES BÂTEAUX. MAIS, VU LE GRAND NOMBRE DES MEMBRURES IDENTIQUES, DES PIÈCES SPÉCIALEMENT CONCUES PEUVENT ÊTRE FABRIQUÉES ÉCONOMIQUEMENT.

L'ASSEMBLAGE MOBILE DE TOUS LES ÉLÉMENTS, CEUX DE LA STRUCTURE AUTOTENDANTE ET DU VOLUME DE REMPLISSAGE, REND LE MONTAGE EXTRÊMEMENT RAPIDE. LEUR PRÉFABRICATION PEUT DÉMARRER PARALLÈLEMENT AUX TRAVAUX D'INFRASTRUCTURE EN BÉTON ARMÉ, RACCOURCISSANT AINSI LE DÉLAI DE CONSTRUCTION IMPOSÉ.

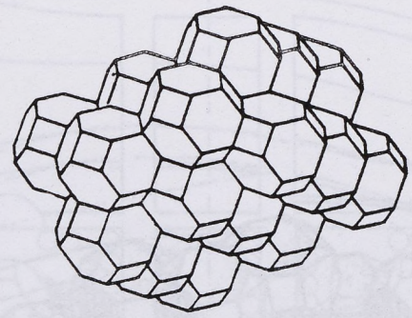
L'ENSEMBLE DES CONSTRUCTIONS AUTOTENDANTES EST COMPOSÉ DE 62 VOLUMES IDENTIQUES, AU TOTAL DE 372 BARRES ET DE 1448 TIRANTS, FORMANT UNE TRAME SPATIALE PORTEUSE RIGIDE , ANTISISMIQUE ET LÉGÈRE. CETTE LÉGÈRETÉ MÊME ÉTANT EXIGÉE PAR L'EXTRÊME ENCOMBREMENT DU SOUS-SOL. DES GROUPES DE FONDATIONS ESPACÉS D'UNE VINGTAINE DE MÈTRES ENJAMBENT LA PLUPART DES OBSTACLES EXCEPTÉ SOUS LE CENTRE OÙ LES CHARGES SONT RAPPORTÉES SUR LES FONDATIONS EXCENTRÉES SITUÉES DANS LES ILÔTS DE SOL DISPONIBLE À L'AIDE D'UN RADIER. LE SOUBASSEMENT DES ÉDIFICES EST SURÉLEVÉ POUR CETTE RAISON AU NIVEAU DE 63,00, CELUI DES RIVES LONGEANT LE CENTRE COMMERCIAL, NIVEAU QUI PERMET ÉGALEMENT D'ENJAMBER LA ROUTE CIRCULAIRE PAR DES PASSERELLES PROLONGEANT VERS L'OUEST L'ALLÉE CENTRALE, SUITE DE L'AXE HISTORIQUE.

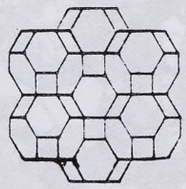


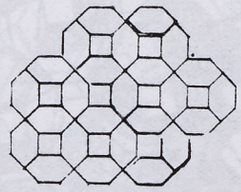


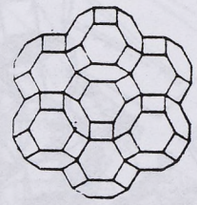


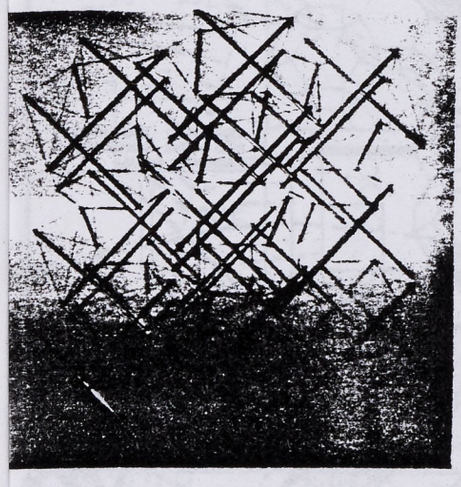
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE









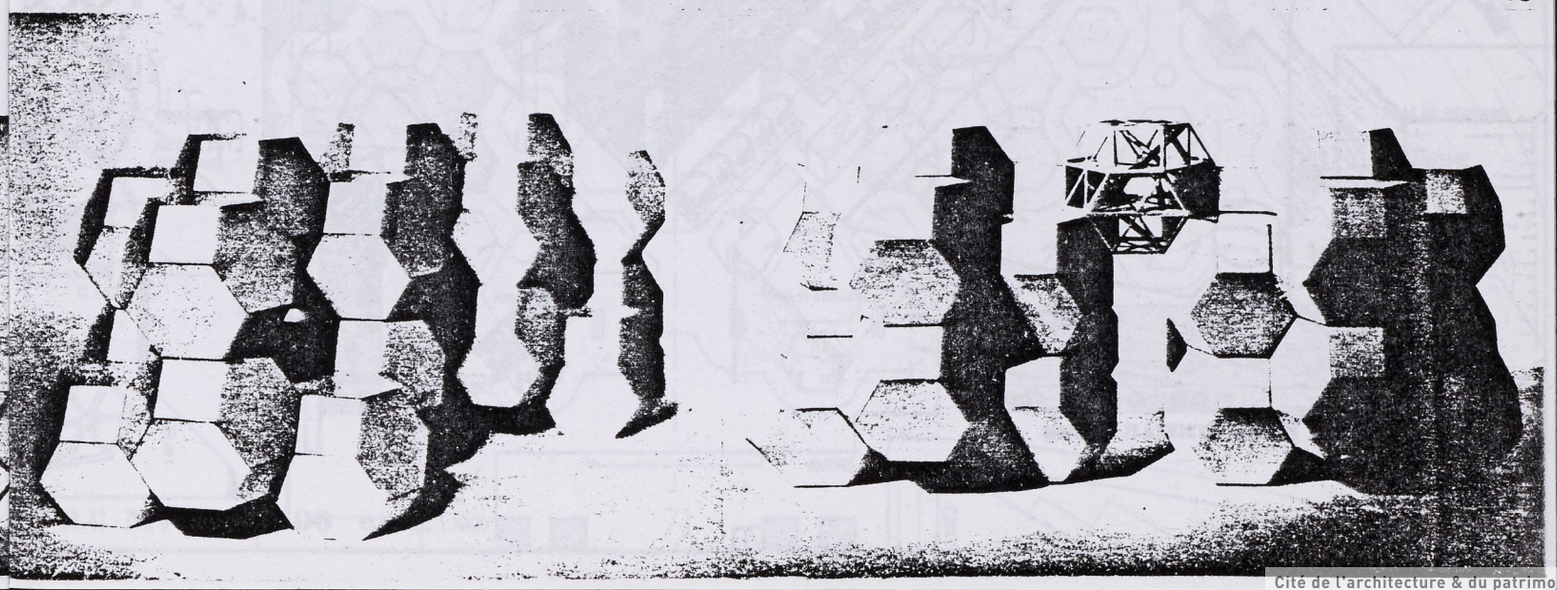


La configuration générale des masses est fondée sur une modénature spatiale qui est l'équipartition tétrakaïédrique, dans laquelle on découpe des groupes de maillons volumétriques. Ce tracé modulateur a une projection planaire au sol, qui est une tessellation composée de triangles, de rectangles et d'hexagones. C'est ce tracé qui régit toutes les implantations sur le terrain: fondations, masses construites et les cours d'honneur.

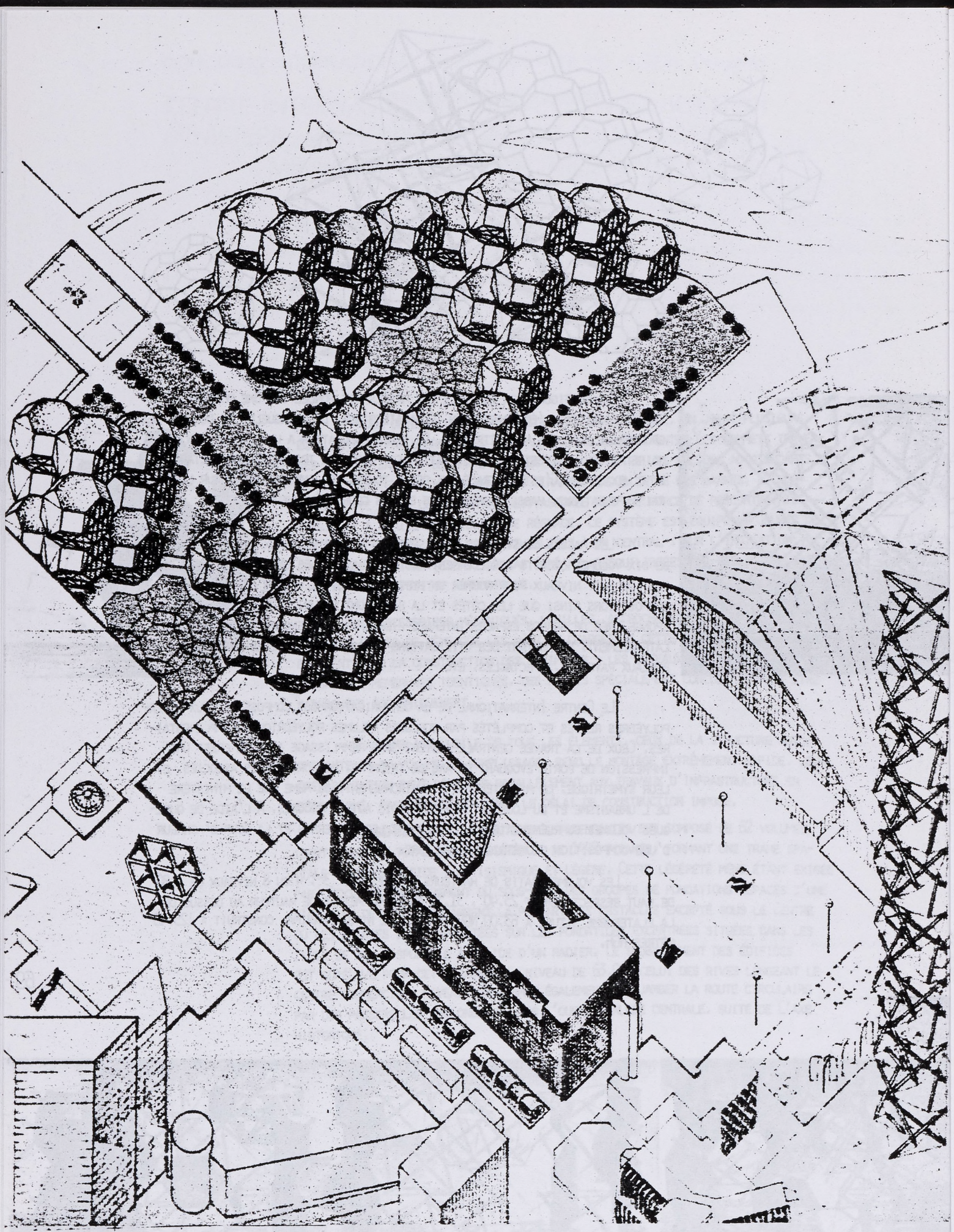
Les masses construites utilisent des motifs spatiaux eux-mêmes composés de dix volumes décrits précédemment, qui sont assemblés en un empilement compact de huit niveaux pour former un hyperpolyèdre. Le volume central de ces compositions ainsi que les côtés et la base sont creux. Cette morphologie en éponge crée de grands espaces internes libres de tout encombrement, éclairés latéralement, permettant des utilisations très vatiées: salles de réunions, bureaux paysagés, spectacles, etc.

Le Centre International de la Communication est composé de deux hyperpolyèdres reliés et complétés par quelques volumes polyédriques complémentaires. Ceux de la travée centrale restent sans remplissage afin de créer une impression de porte évoquant un arc de triomphe. Les organismes associés, et leur symétrique, le ministère de l'environnement, de même que le ministère de l'urbanisme et du logement forment trois autres groupes. A l'aide de quelques volumes supplémentaires, ils cernent les parterres et la cour d'honneur d'une composition géométrique régulière.

Les volumes bâtis de hauteurs variées ont 3 , 4 ou 8 niveaux de 7,80 de haut respectivement 23,40 , 31,20 ou 62,40 mètres de hauteur au dessus de la plateforme située à 63,00 NGF, portant le niveau maximal construit à 125,40 mètres NGF.

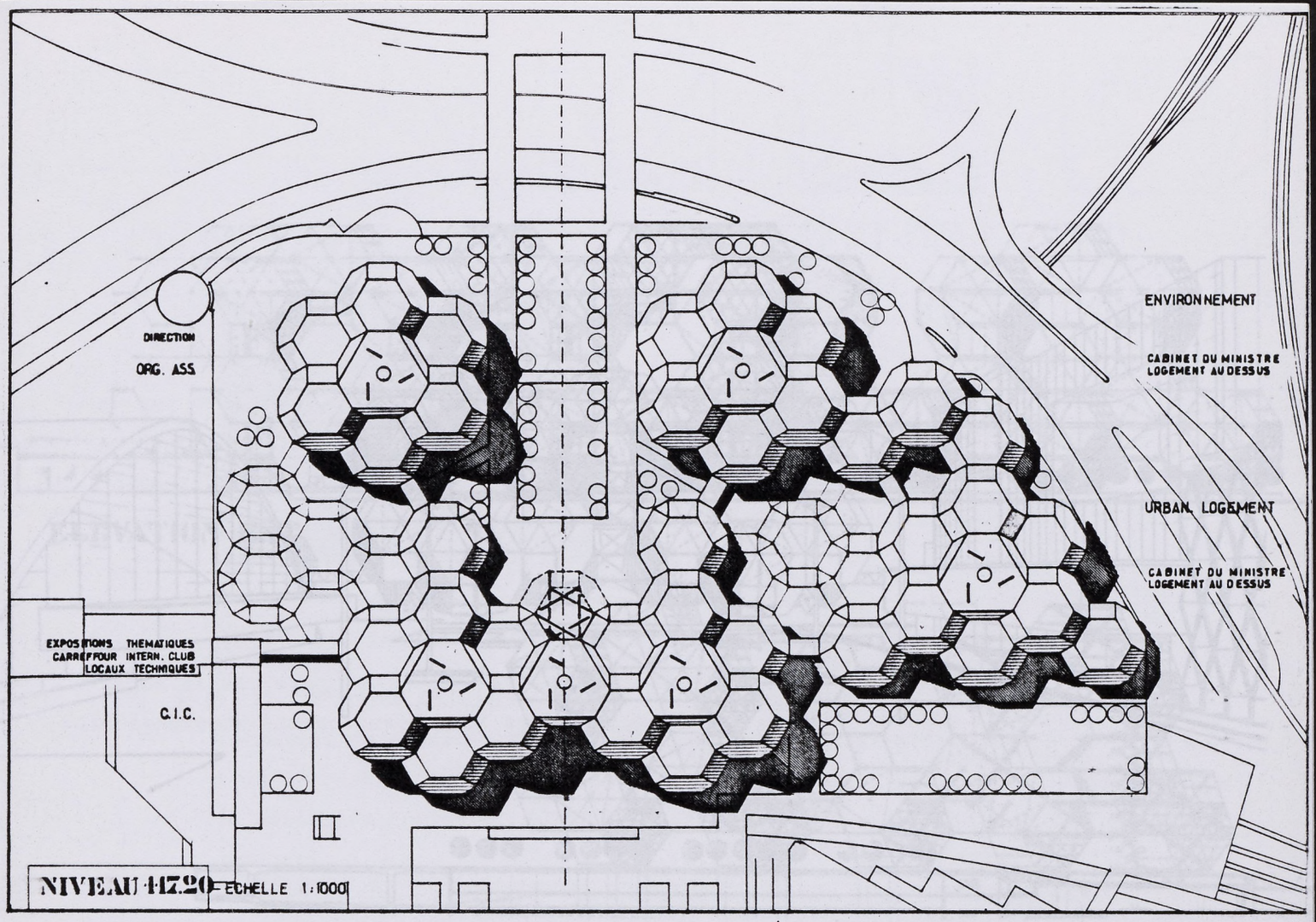


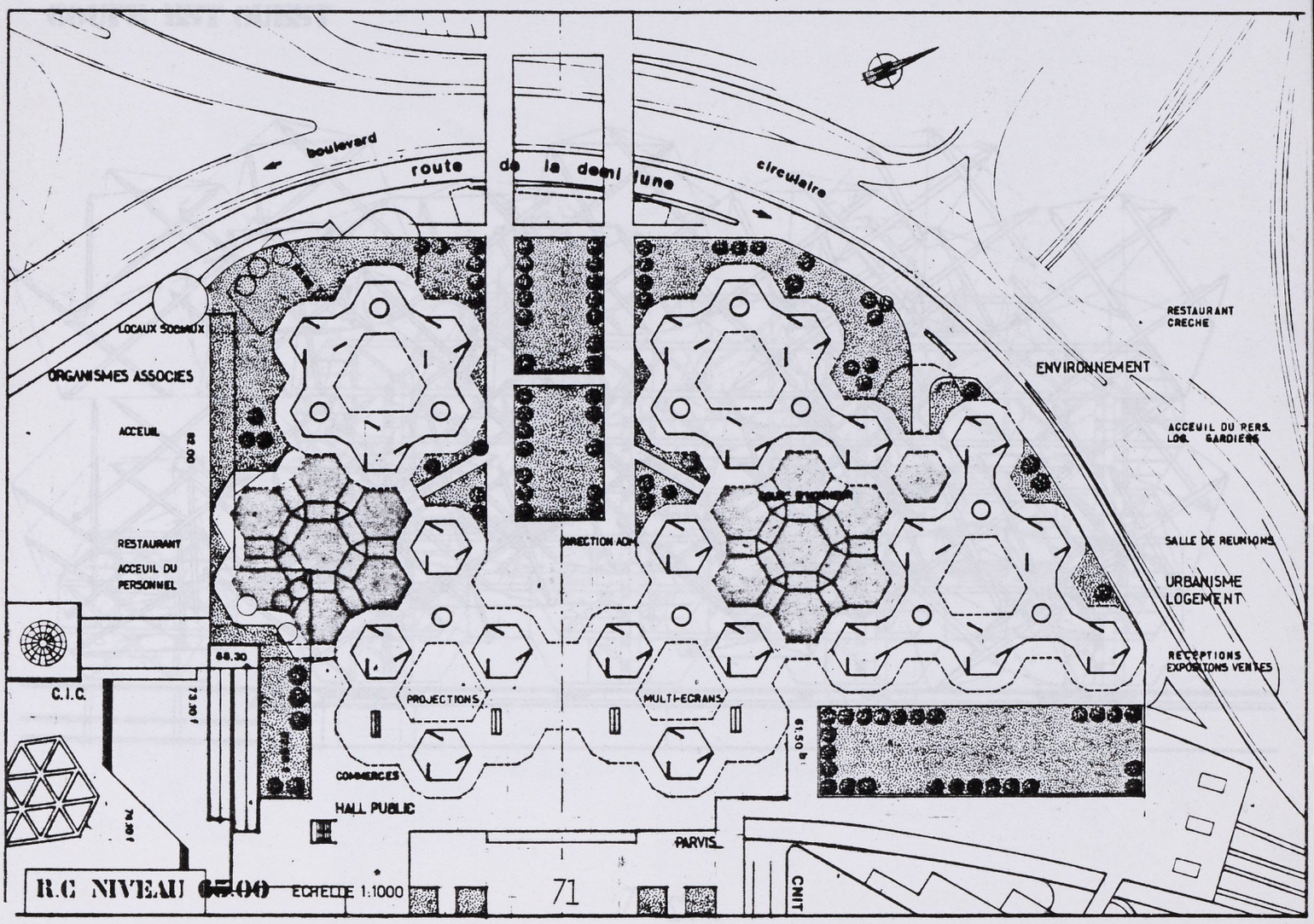
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE



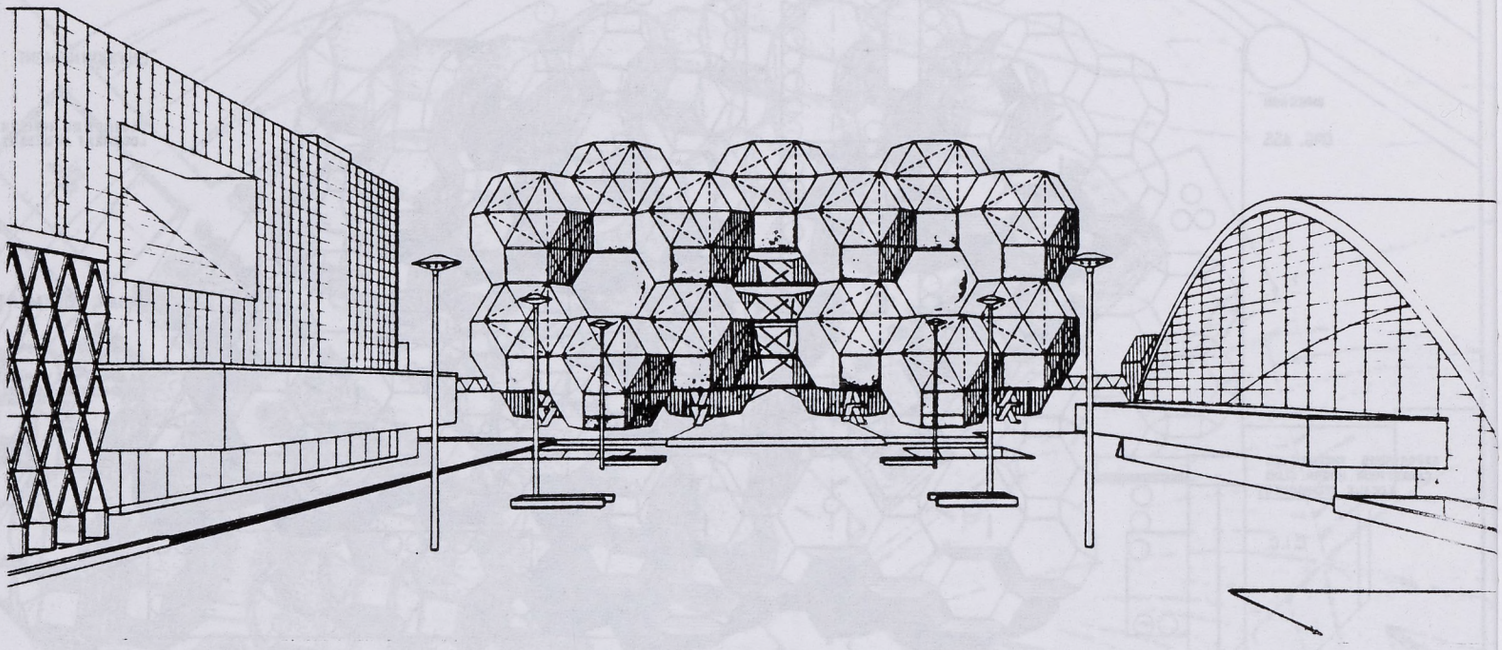
AXONOMETRIE ECHELLE 1:1000

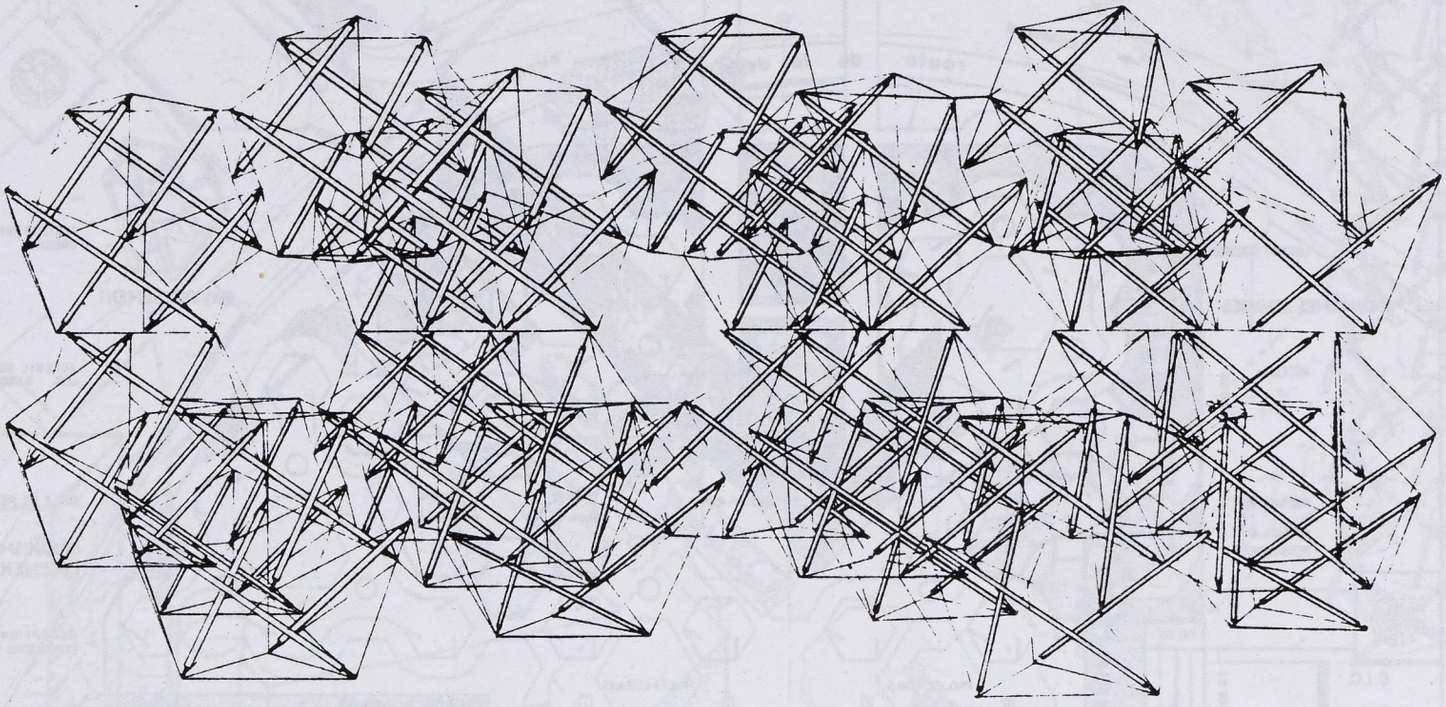
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE



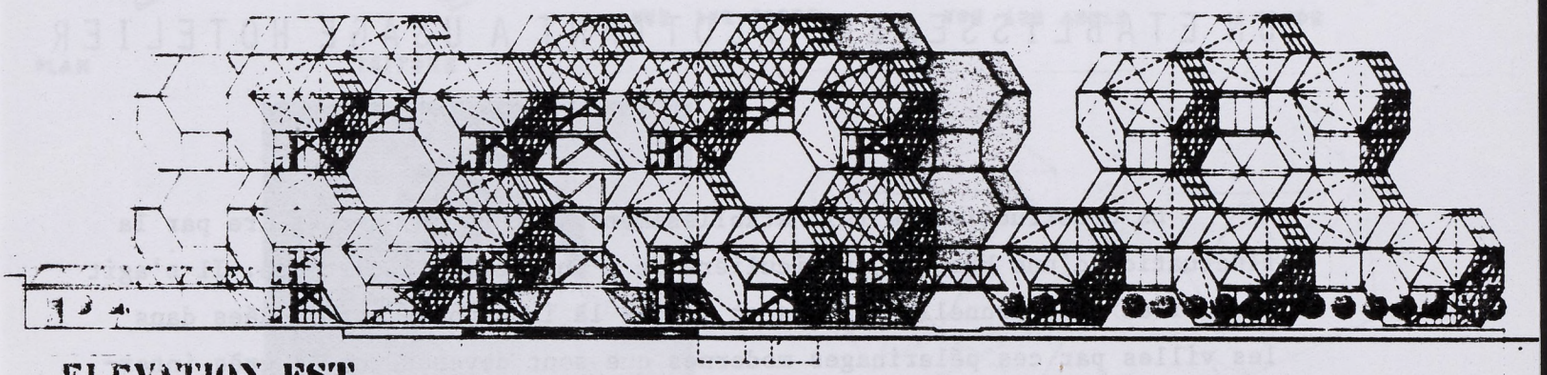


Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

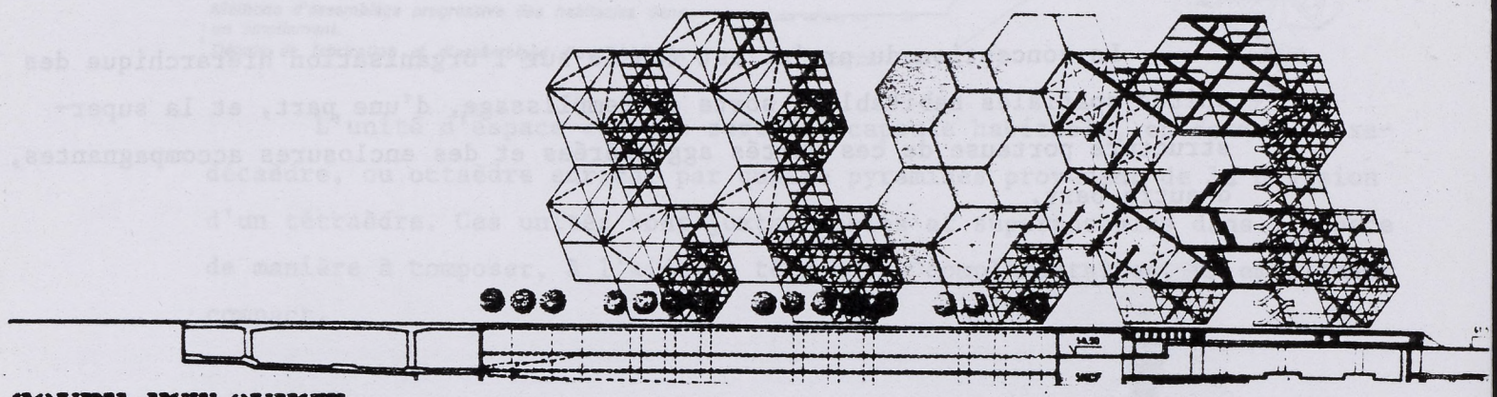




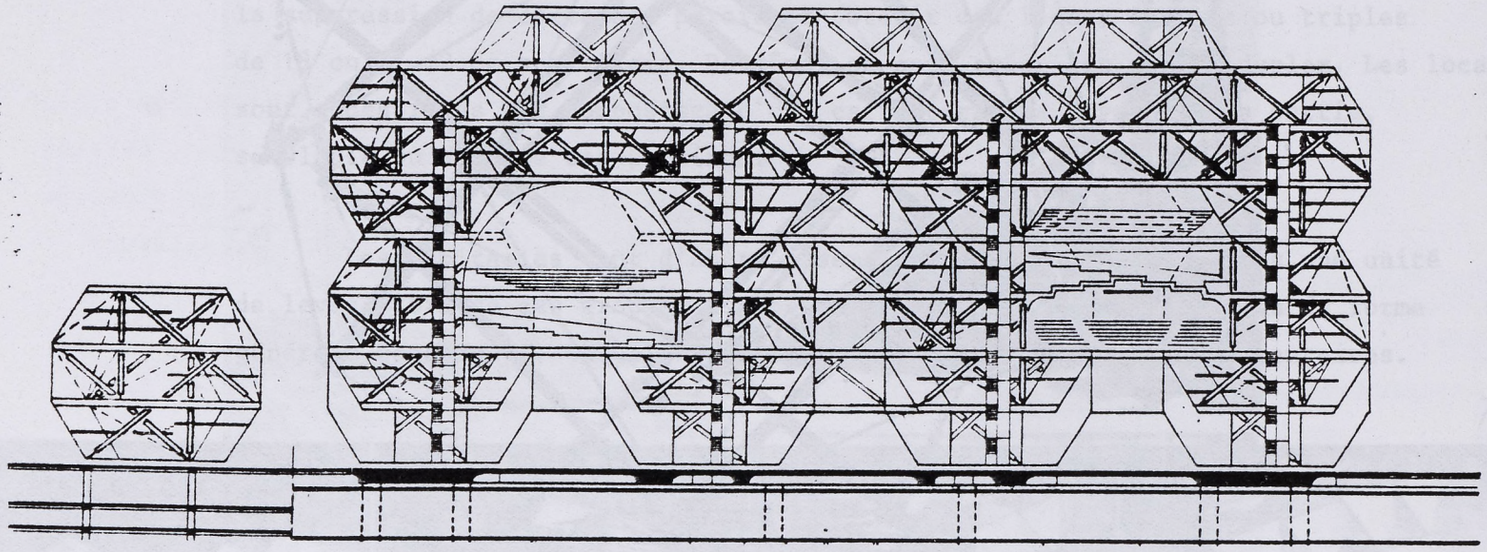
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE



ELEVATION EST



COUPE EST OUEST

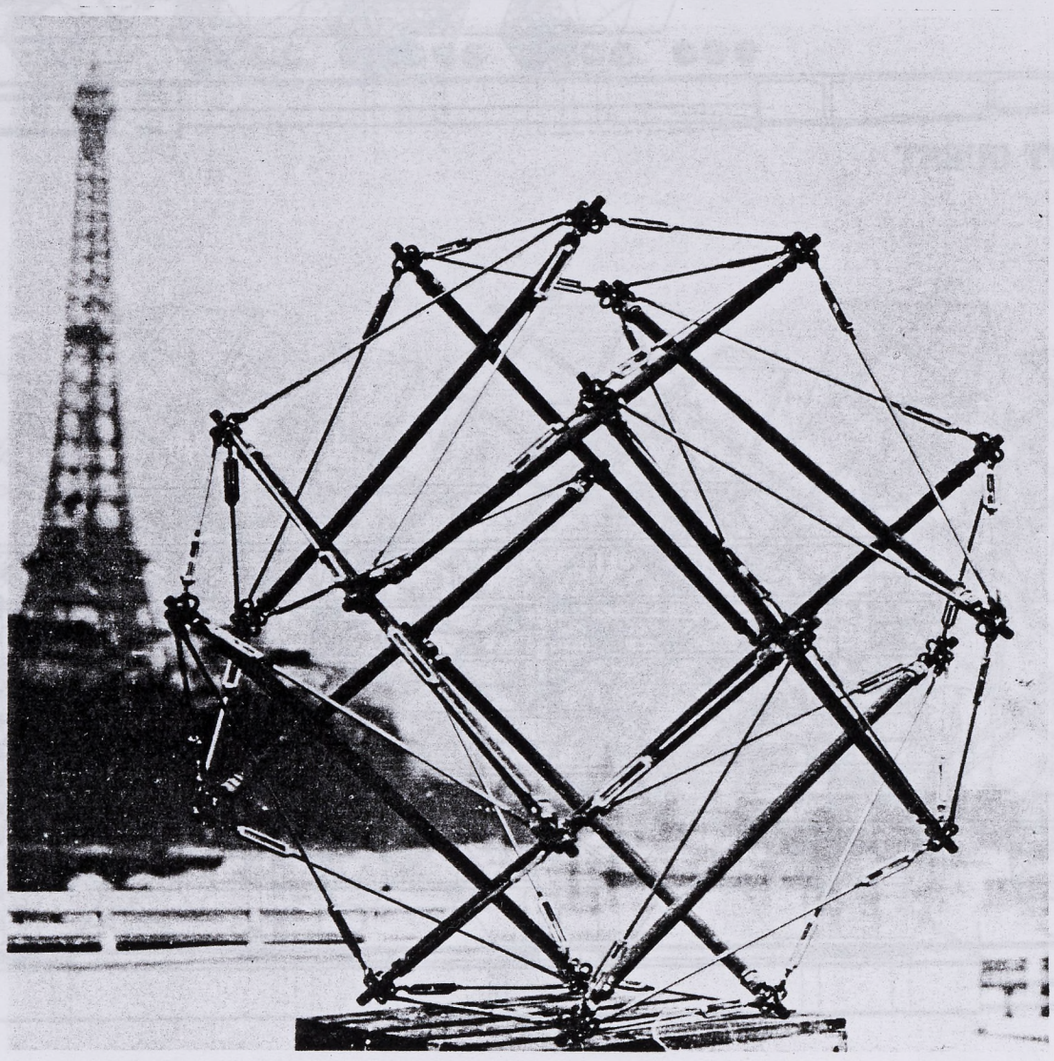


Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

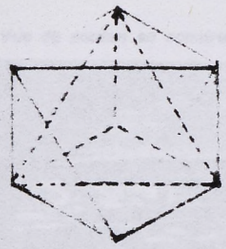
UN ETABLISSEMENT FLOTTANT A USAGE HOTELIER

La construction de tels établissements est rendue nécessaire par la fluctuation d'une branche particulière de l'industrie touristique. Il s'agit des crises occasionnelles aigües et jusque là insolubles, provoquées dans les villes par ces pélerinages modernes que sont devenus les congrès internationaux.

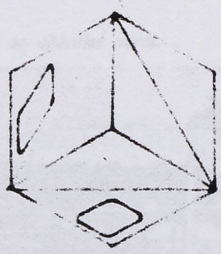
La conception du projet est fondée sur l'organisation hiérarchique des unités spatiales habitables, sorte de remplissage, d'une part, et la superstructure porteuse de ces unités agglomérées et des enclosures accompagnantes, d'autre part.



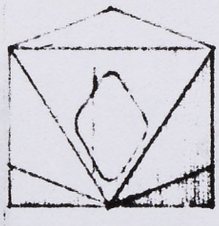
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE



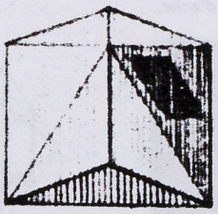
PLAN



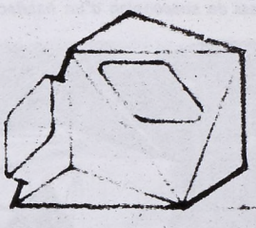
TOITURE



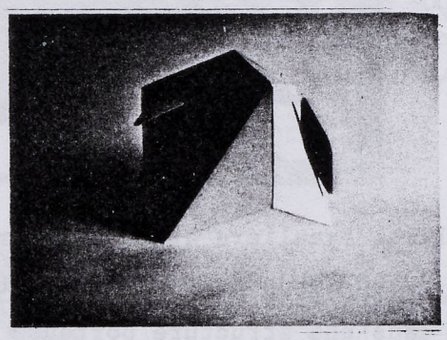
VUE SUR PORTE

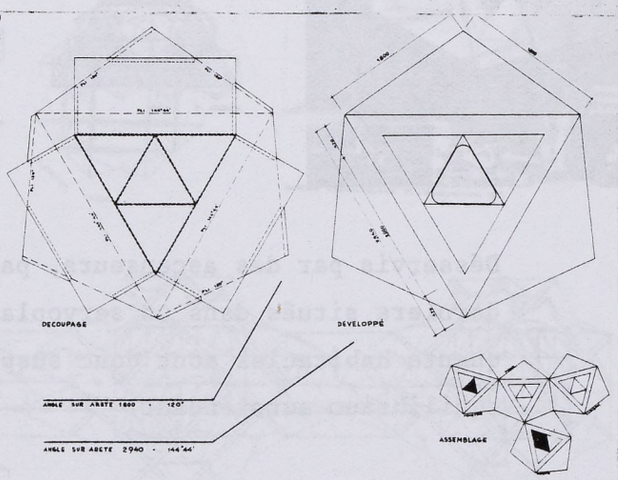


VUE SUR ANGLE



COUPE





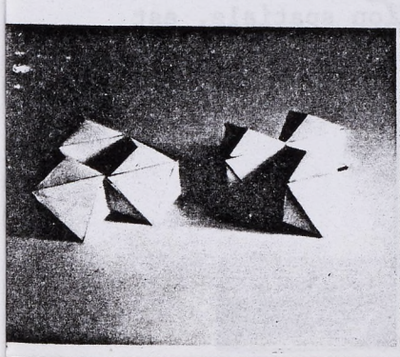
Méthode d'assemblage progressive des habitacles dans un empilement.
Détails de fabrication et d'assemblage d'un habitacle.

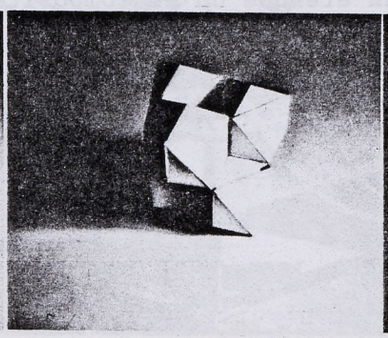
L'unité d'espace est une sorte de capsule habitable, en forme d'hexadécaèdre, ou octaèdre enrichi par quatre pyramides provenant de la division d'un tétraèdre. Ces unités sont juxtaposables et superposables dans l'espace de manière à composer, à l'aide de tétraèdres complémentaires, un empilement compact.

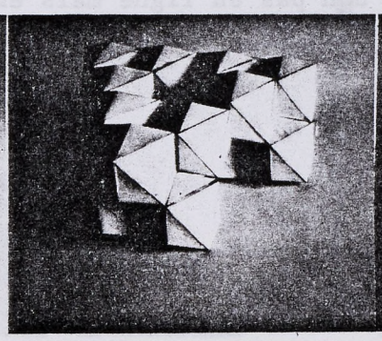
Ces capsules stéréométriques, de plan hexagonal au sol, ont une surface de 9 m2; les tétraèdres interstitiels comportant les équipements sanitaires, 1,5 m2. Chaque volume est construit de quatre parois hexagonales pliées en tôle d'acier avec des isolants à base de laine de verre. Une variante étudiée utilisait des surfaces minima hexagonales en polyester armé de fibres de verre.

Dans un assemblage compact, on peut réunir deux ou trois unités par la suppression de certaines parois et obtenir des locaux doubles ou triples de 18 ou 27 m2 de superficie. De même, on peut créer des pièces duplex. Les locaux sont accessibles par compostage d'une carte perforée payable à la sortie, semblable au système des parkings.

Les habitacles sont d'abord assemblés par groupe de six dans une unité de levage. Six de ces groupes composent sur quatre niveaux un noyau de forme générale octaédrale, auquel se rajoutent quelques éléments supplémentaires.

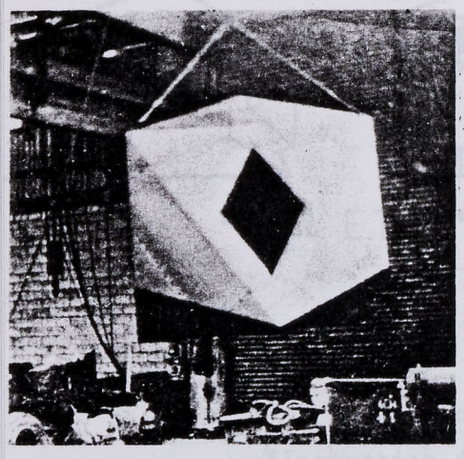


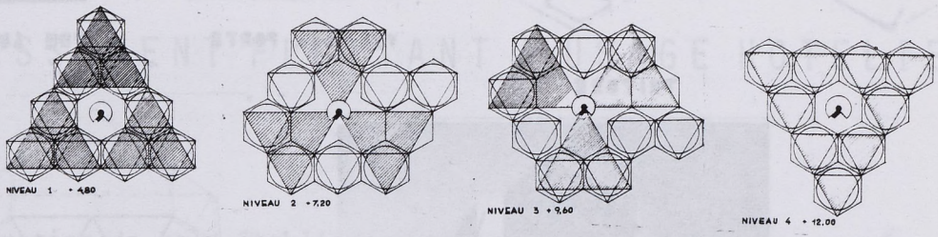




Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Essai de suspension d'un habitacle en tôle d'acier.





Désservis par des ascenseurs, passerelles, escaliers et conduits rampants, ces derniers situés dans un servoplancher de 60 cm de hauteur, quarante à cinquante habitacles sont donc suspendus dans une structure porteuse qui est un equilibrium autotendant.

Cette structure, ayant la forme générale d'un tétracaïdécaèdre, est constituée de 12 mâts de charge et de 48 tirants. Haute de 19,20 m, elle prend appui sur quatre points, laissant au sol quasi toute la surface libre. Les quatre points d'ancrage sont des rotules de type cardan.

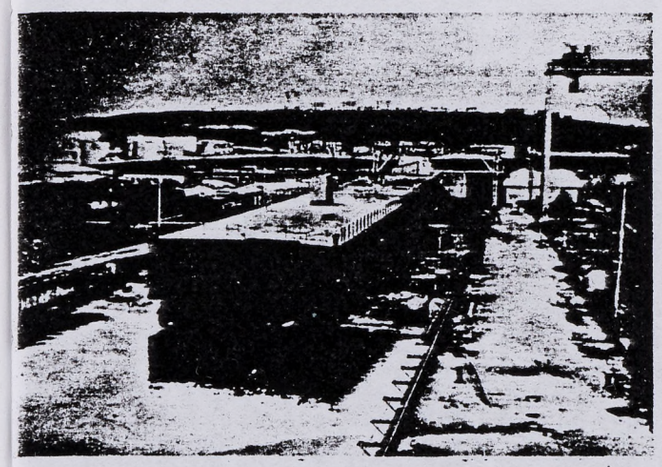
Dans ce projet, trois equilibriums, dans lesquels sont suspendus au total 120 à 150 habitacles, sont placés en ligne sur un ponton de 80 m de long et de 12 m de large. Les deux intervalles formant des sortes de voûtes, où se situent les zones réservées aux salons et des locaux de rencontre. Outre les passerelles d'accès et les deux groupes de circulation verticale, on trouve, distribués sur le pont supérieur, la réception, des boutiques et en général des services accessibles au public. Ces aménagements sont aussi constitués par des moyens mobiles: voiles tendues pour les grandes surfaces, habitacles groupés pour les plus petites.

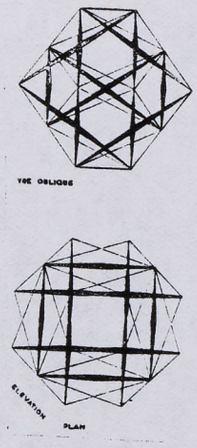
Le ponton, en partie submergé, contient les services généraux non accessibles au public: locaux d'administration et du personnel, machinerie, cuisine, dépôts, etc. La barge est lestée de sorte que le vent le plus fort ne provoque qu'un gîte de 3 degrés maxima. Des caissons étanches le rendent, d'ailleurs insubmersible.

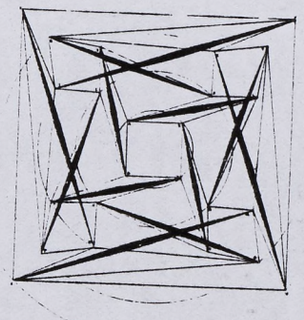
Il va de soi, que la construction de semblables édifices sur la terre ferme, et non pas en ligne mais en étendue ou en composition spatiale, est encore plus aisée.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

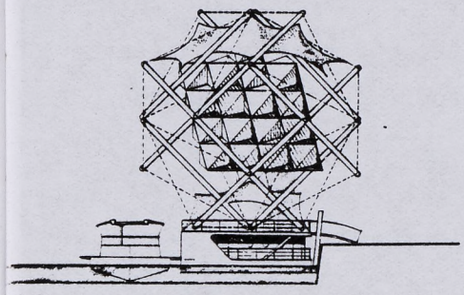
Vue du ponton en construction dans un chantier naval.

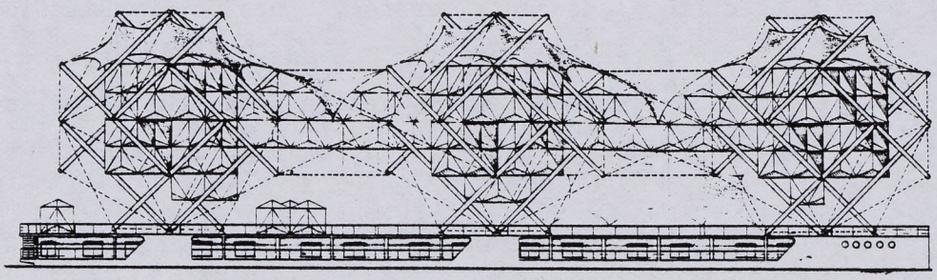


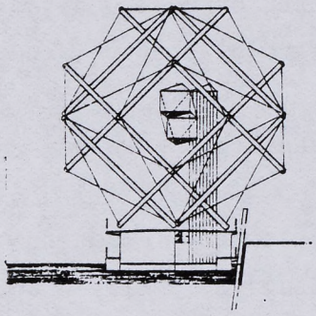


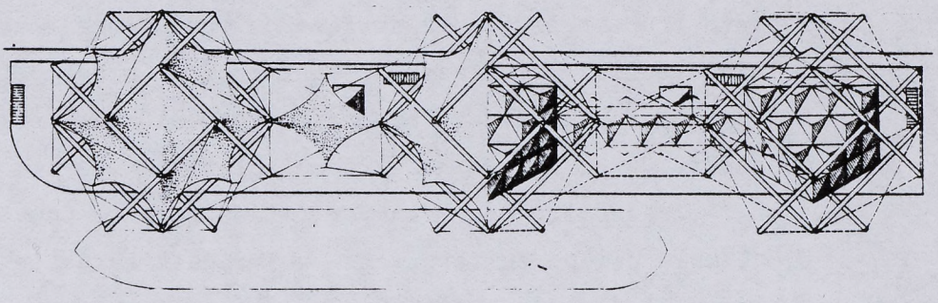


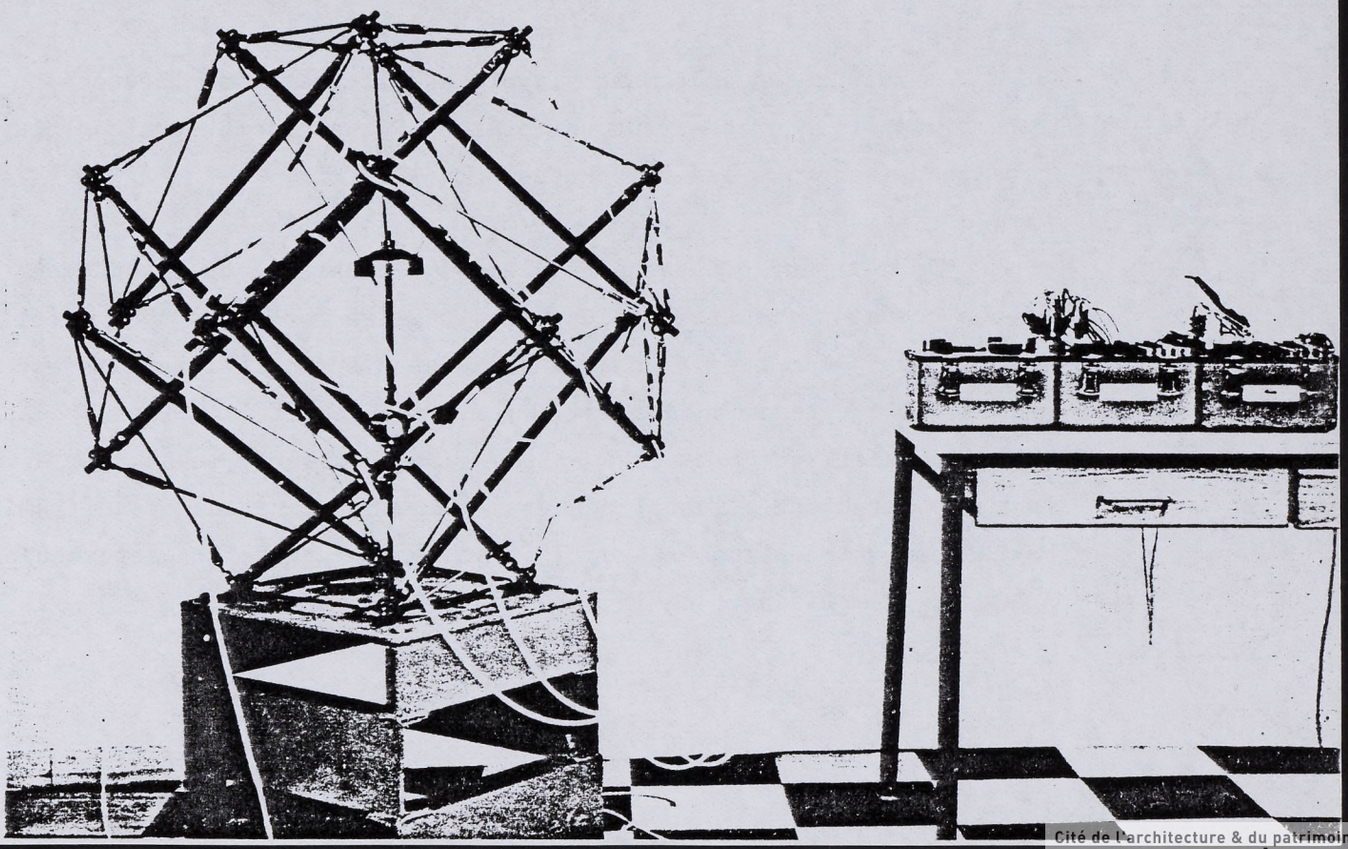
SCHEMA D'ASSEMBLAGE DE L'EQUILIBRIUM 125





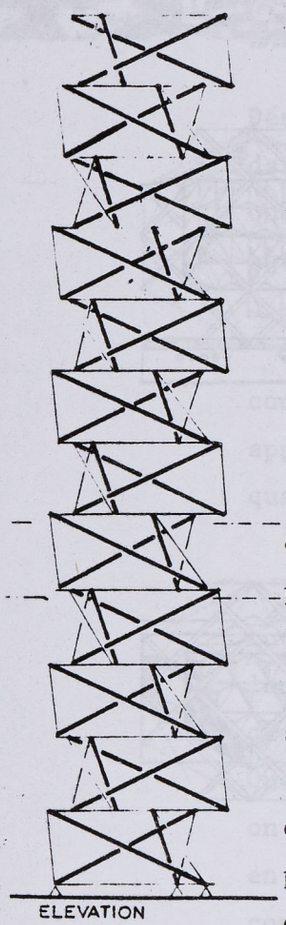






Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

ANTENNES, PYLONES, TOURS



ELEVATION

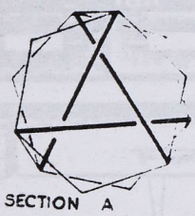
Des mâts qui sont des structures oblongues composées par étage trouvent leur emploi le plus évident comme antennes collectives, pylônes de transport électriques de haute tension, tours de transmission, etc. Les mâts de relativement faible dimension peuvent être construits avec une section constante puis haubannés comme les antennes habituelles; les tours de grande hauteur peuvent être de diamètre décroissant à l'exemple de la Tour Eiffel.

De nombreux arguments plaident en faveur de leur emploi pour ces fonctions:

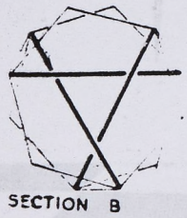
- l'excellente tenue face au vent de ces structures où les barres occupant toujours une position oblique et les tirants en nombre prépondérant, prêtent une très faible surface de résistance; cet avantage s'accentue avec la hauteur où la vitesse du vent croît rapidement.
- facilité de fabrication: par éléments standard assemblables sans soudure, avec des joints articulables.
- facilité de transport: la structure pouvant être conçue comme un ensemble pliant se refermant en faisceau après le prémontage et déployée sur place. En cas d'accès difficile, elle peut être acheminée aussi en pièces détachées.
- moindre encombrement visuel: par leur extrême légèreté et transparence, ces structures auront une présence plus discrète, sinon plus esthétique dans le paysage que les charpentes actuelles.

PLAN

Un mât peut constituer également l'ossature porteuse d'une tour aménageable comme logements, bureaux, etc. utilisé toutefois avec un élancement plus faible. Afin que les barres obliques n'encombrent pas les espaces intérieurs, il est recommandable de choisir une échelle d'utilisation relativement grande de sorte que plusieurs étages correspondent à la hauteur d'un sous-ensemble structural; les planchers se situant au niveau des extrémités des barres pouvant collaborer avec l'ossature, les planchers intermédiaires étant des remplissages de la structure principale.



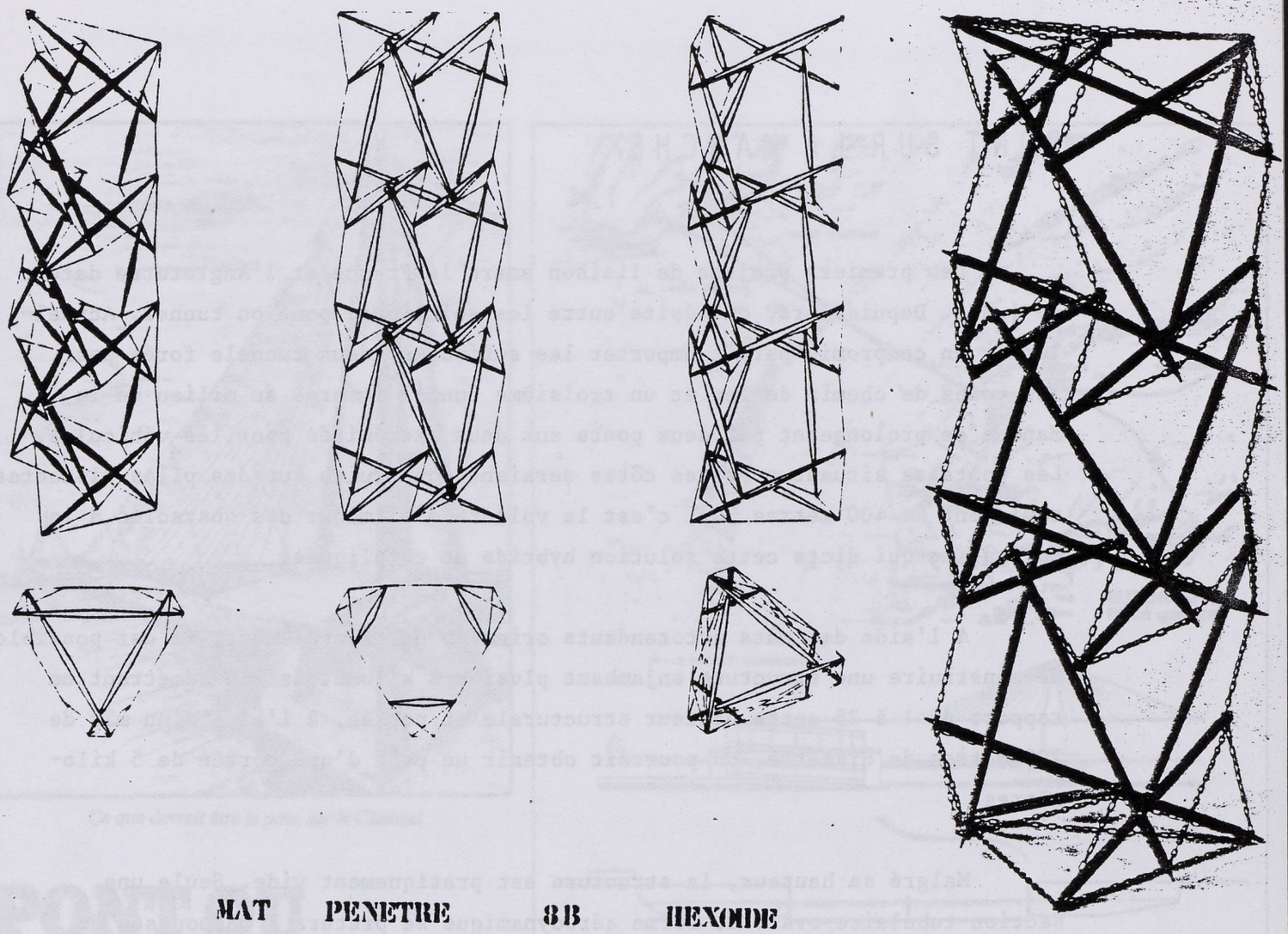
SECTION A



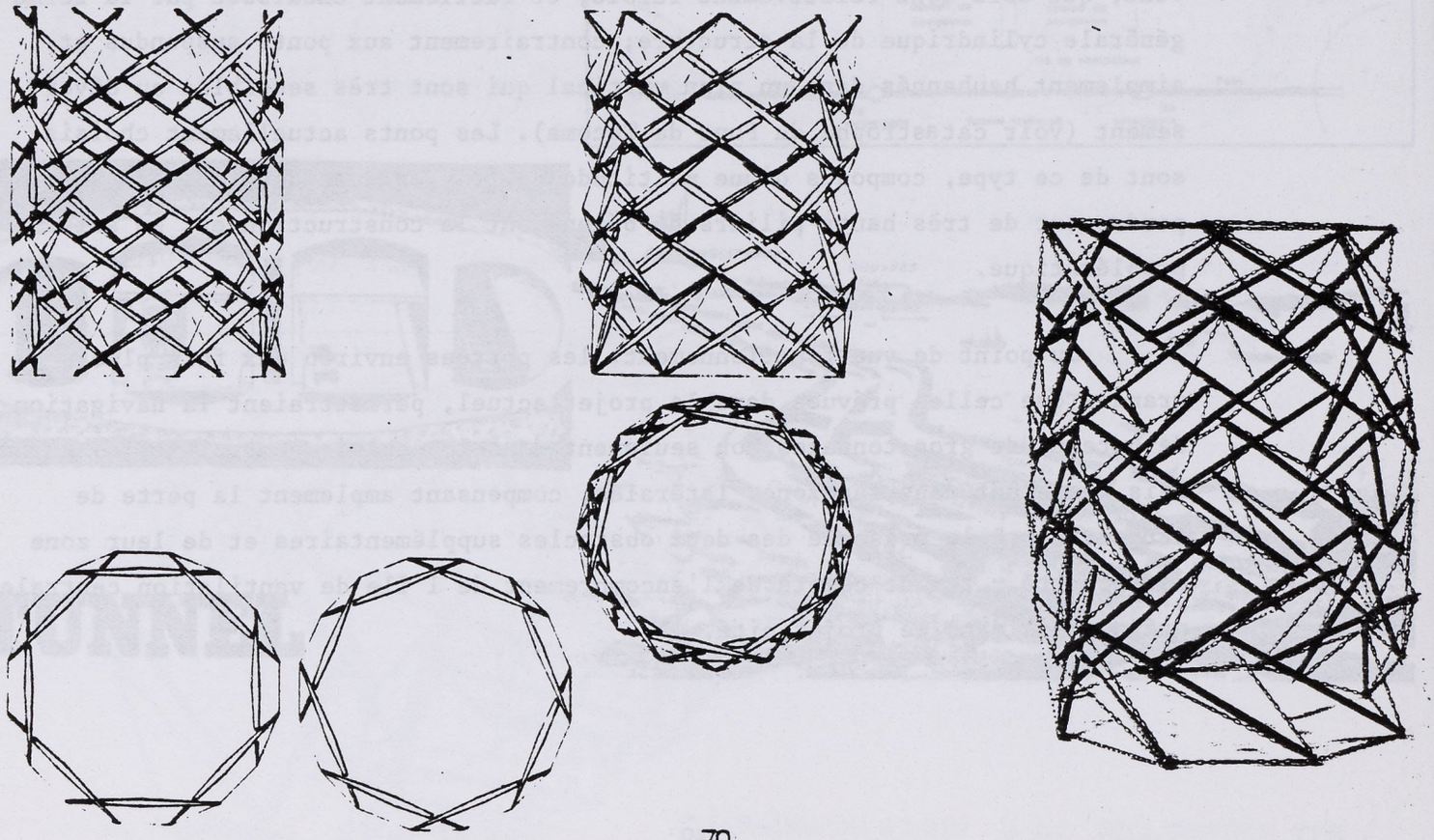
SECTION B

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

MAT ENTRELACE 9B DELTOOCTOGONALE



MAT PENETRE 8B HEXOIDE



Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

PONT SUR LA MANCHE

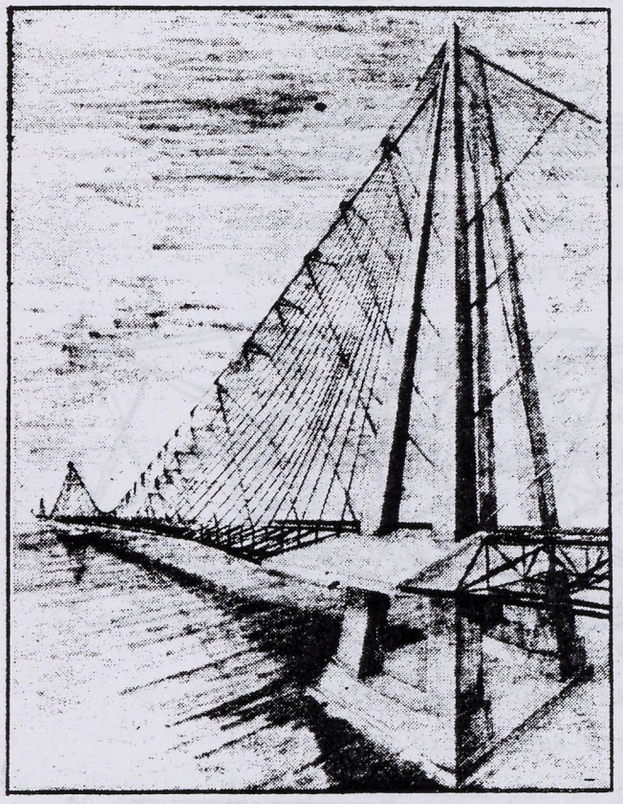
Les premiers projets de liaison entre le France et l'Angleterre datent de 1.876. Depuis lors, on hésite entre les solutions: pont ou tunnel. Actuellement un compromis parait emporter les suffrages: deux tunnels forés pour les voies de chemin de fer et un troisième tunnel immergé au milieu de la Manche se prolongeant par deux ponts aux deux extrémités pour les véhicules. Les ponts se situant près des côtes seraient construits sur des piles distantes seulement de 400 mètres. Or, c'est la volonté d'éliminer des obstacles à la navigation qui dicte cette solution hybride et compliquée.

A l'aide des mâts autotendants orientés horizontalement, il est possible de construire une structure enjambant plusieurs kilomètres. En admettant un rapport de 1 à 25 entre hauteur structurale et portée, à l'aide d'un mât de 200 mètres de diamètre, on pourrait obtenir un pont d'une portée de 5 kilomètres.

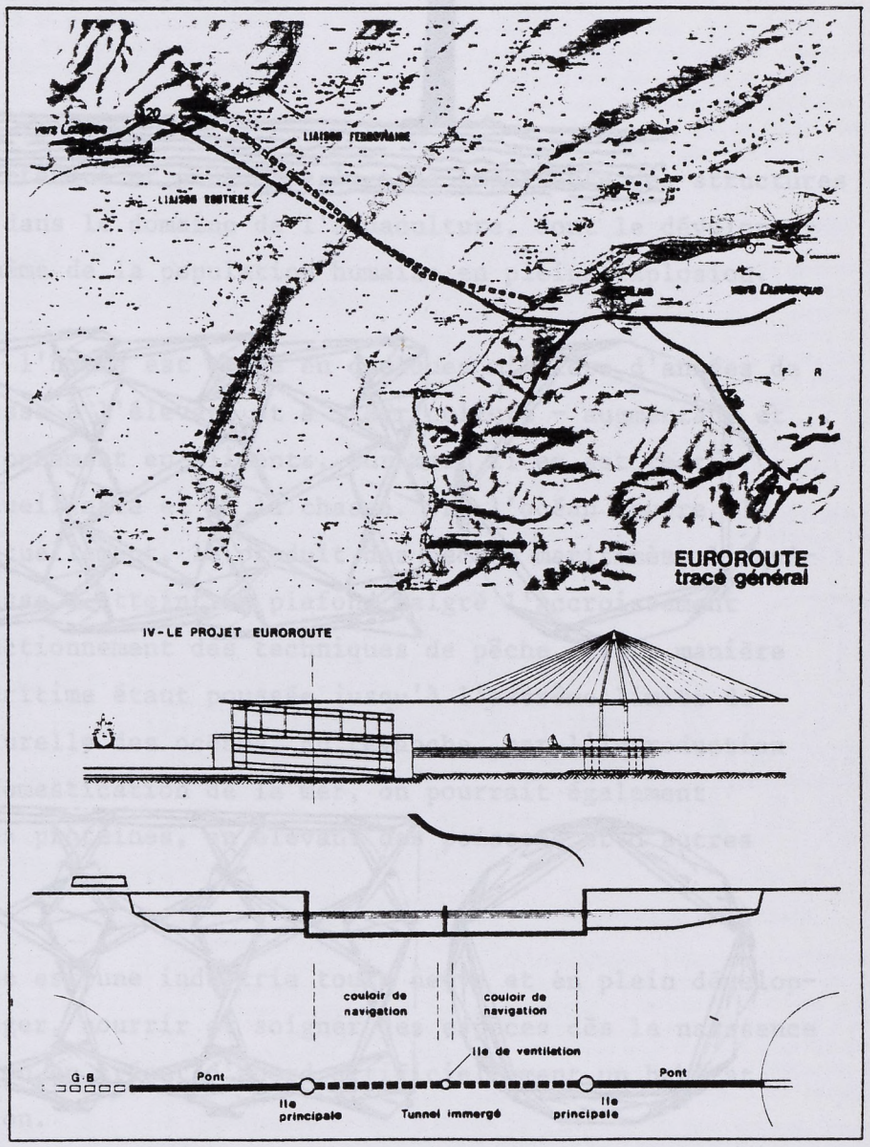
Malgré sa hauteur, la structure est pratiquement vide. Seule une section tubulaire ovale de forme aérodynamique se prêtera à la poussée du vent, qui sera donc relativement faible, et facilement encaissée par la forme générale cylindrique de la structure; contrairement aux ponts suspendus et simplement haubannés dans un plan vertical qui sont très sensibles au déversement (voir catastrophe du Pont de Tacoma). Les ponts actuellement choisis sont de ce type, composés d'une multitude de travées avec des tabliers suspendus sur de très hauts piliers de béton dont la construction est en soi problématique.

Du point de vue fonctionnement: les portées environ dix fois plus grandes que celles prévues dans le projet actuel, permettraient la navigation de bateaux de gros tonnages non seulement dans le couloir central de la Manche mais également dans les zones latérales, compensant amplement la perte de largeur due à la présence des deux obstacles supplémentaires et de leur zone de sécurité - tenant compte de l'encombrement de l'île de ventilation centrale prévue déjà dans le projet cité.

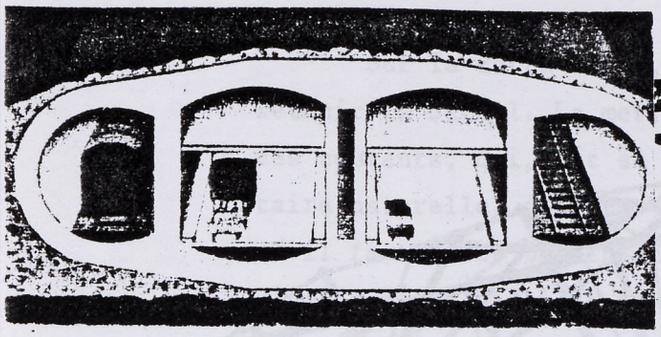
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

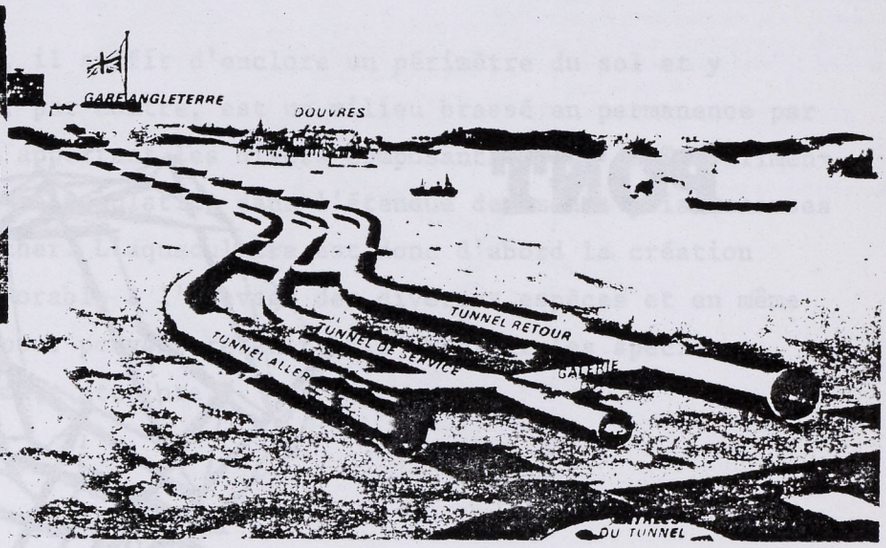


Ce que devrait être le pont sur le Channel



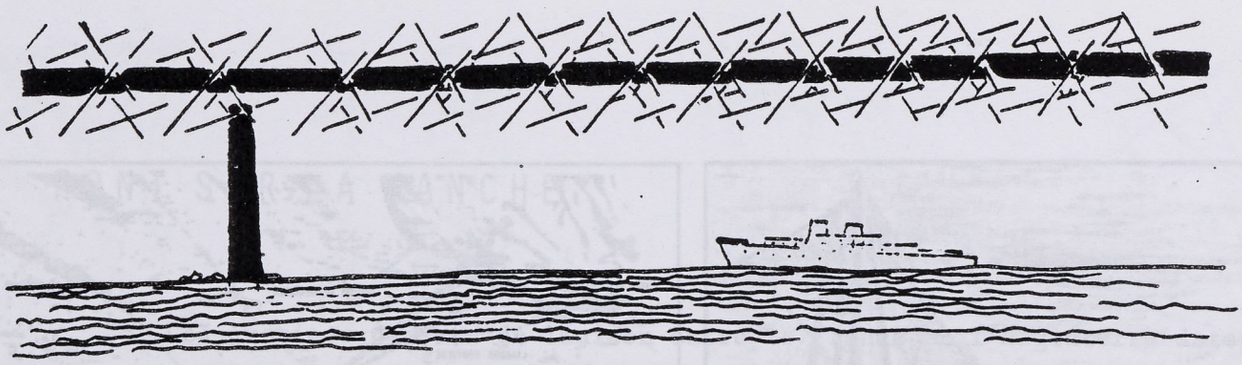
PONT OU

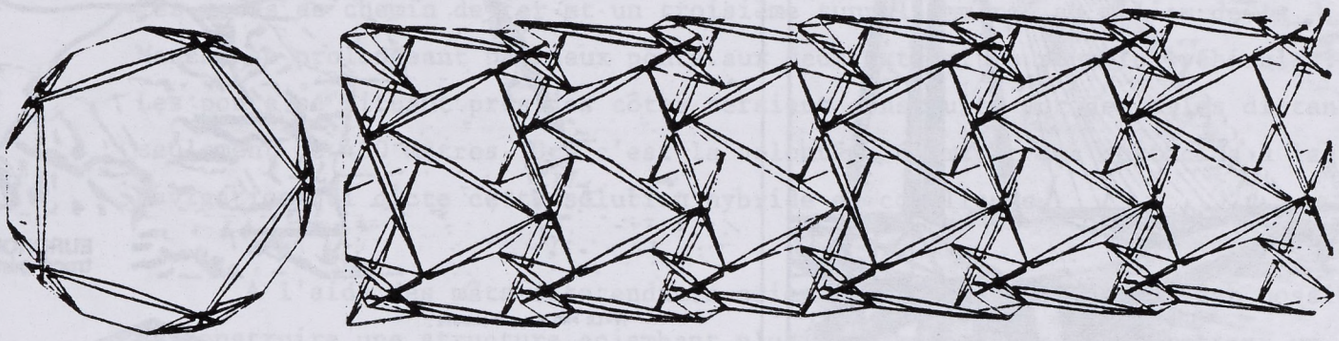


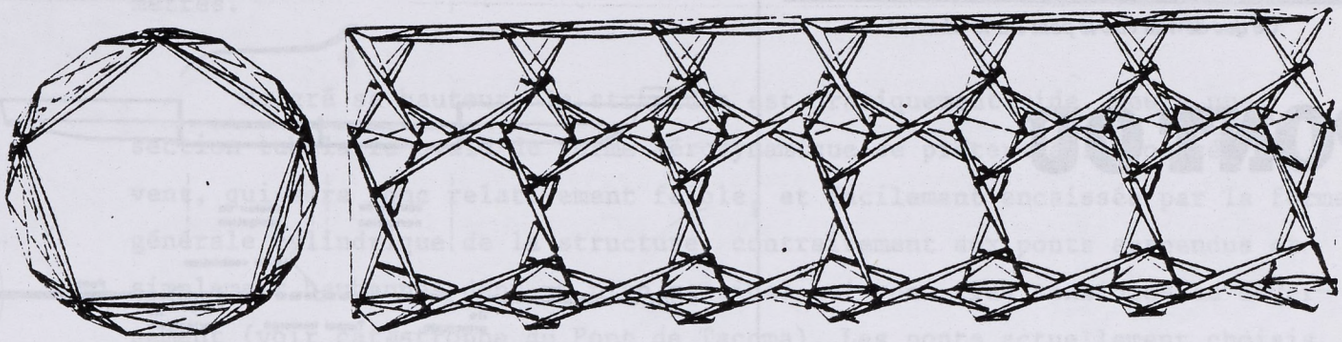


TUNNEL

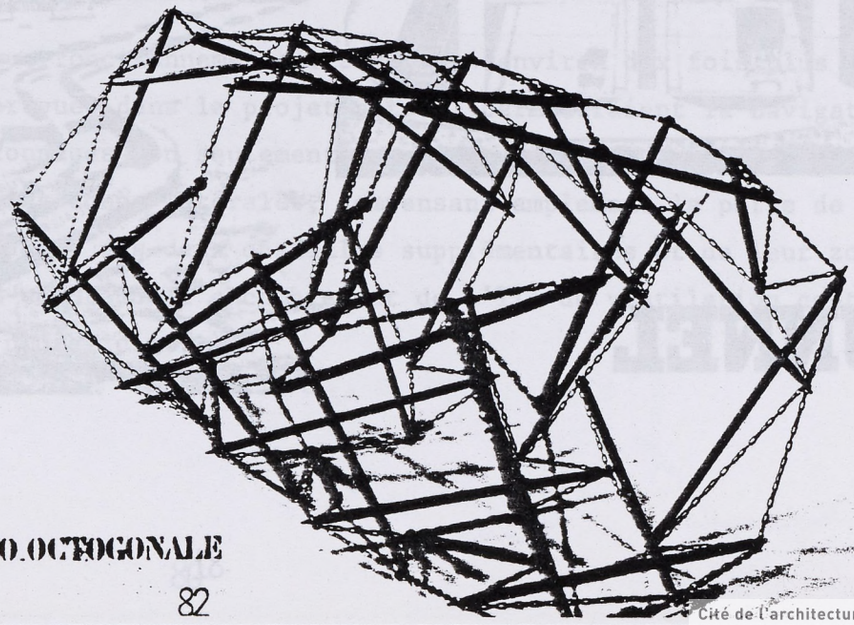
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE







PONT



MAT ENTRELACE 15 B DELTO.OCTOGONALE

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

NASSES POUR AQUACULTURE

Une application inattendue et peut-être la plus importante des structures autotendantes se présente dans le domaine de l'aquaculture, dont le développement est lié à la survie même de la population humaine en pleine explosion.

Sur la terre ferme, l'homme est passé en quelques milliers d'années de la cueillette et de la chasse à l'élevage et à l'agriculture - augmentant et régularisant son approvisionnement en aliments. Sur mer, il en est resté, cependant,au stade de la cueillette et de la chasse. Or, l'océan couvre 71% de la surface du globe. Actuellement, le produit des pêches maritimes, l'équivalent aquatique de la chasse a atteint un plafond malgré l'accroissement des flottilles et le perfectionnement des techniques de pêche, cette manière d'exploiter la richesse maritime étant poussée jusqu'à l'extrême limite de la capacité biologique naturelle des océans. En revanche, par l'introduction de l'élevage donc par la domestication de la mer, on pourrait également accroître la production des protéines, en élevant des poissons et d'autres espèces marines.

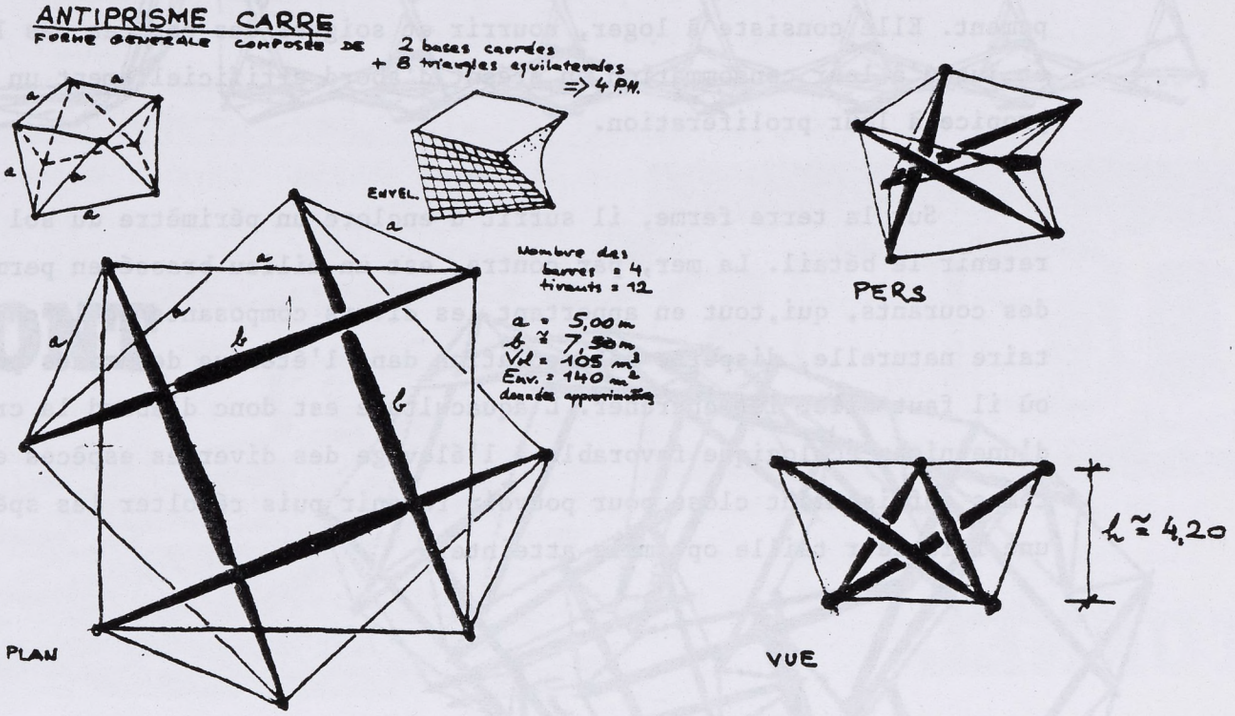
L'aquaculture marine est une industrie toute neuve et en plein développement. Elle consiste à loger, nourrir et soigner des espèces dès la naissance et jusqu'à leur consommation en créant d'abord artificiellement un habitat propice à leur prolifération.

Sur la terre ferme, il suffit d'enclore un périmètre du sol et y retenir le bétail. La mer, par contre, est un milieu brassé en permanence par des courants, qui,tout en apportant les divers composants de la chaîne alimentaire naturelle, disperse sa population dans l'étendue des zones poissonneuses où il faut aller les chercher. L'aquaculture est donc d'abord la création d'une niche écologique favorable à l'élevage des diverses espèces et en même temps suffisamment close pour pouvoir retenir puis récolter les spécimens, une fois leur taille optimale atteinte.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Du point de vue de l'habitat, il s'agit de définir la densité optimale de la population puis une configuration d'éléments matériels qui attire et retienne les divers poissons, qui ont besoin de repères et de caches pour élire domicile. Une cage de vivarium immergée doit être relativement grande, les poissons étant des êtres sociables mais se déplaçant beaucoup. Or, il n'existe actuellement aucune technique permettant de créer des cages d'une contenance de plusieurs centaines - voire même plusieurs milliers - de mètres cubes dont la structure porteuse et les faces constituées de filets soient capables de résister à la houle destructrice du littoral, excepté les structures autotendantes.

Dès 1976, un contact était établi par l'intermédiaire d'une société qui se présentait comme agent de développement de brevets d'invention, entre le CNEXO (Centre National pour l'Exploitation des Océans) et l'ANVAR (Agence Nationale pour la Valorisation de la Recherche) afin d'expérimenter des structures autotendantes pour la création d'habitats piscicoles de toutes dimensions. Des polyèdres antiprismatiques simples étaient construits de barres de polyester en forme de cigare et flottant dans l'eau, tendant des cables d'acier inoxydable sur lesquels étaient tendus des parois en filet de rilsan en forme de PH. Le développement de cette technique après la communication de nombreux plans, calculs et descriptifs se poursuit avec succès en Bretagne et sur les côtes vendéennes, sans que nous soyons de nouveau contacté.



PARIS. 4.5.77.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Innovations maritimes et aménagement du littoral

Réuni il y a quelques jours, un comité interministériel a arrêté le montant des subventions du Fonds d'intervention et d'actions maritimes (FIAM) qui financeront plusieurs études ou opérationspilotes telles que la surveillance de la zone économique des 200 milles par dirigeable, les exportations maritimes des P.M.E., la création d'un département d'architecture navale, des bourses pour l'Université maritime mondiale créée récemment en Suède ou encore un centre de rencontres à la Corderie royale de Rochefort. D'autre part, 250 000 F seront affectés au programme d'immersion de récifs artificiels sur la côte du Languedoc-Roussillon. Ce programme (10 000 mètres cubes de récifs sur trois sites, dans une première tranche, un investissement de 4,6 millions de francs) sera accompagné d'un « suivi scientifique » rigoureux sur trois ans (2,5 millions de francs). Les récifs artificiels qui servent d'habitat aux poissons illustrent bien les conflits dont le littoral est l'objet (pêche, ports, tourisme, environnement, aquaculture, zones militaires) et que la future loi, présentée dans ses grandes lignes par M. Guy Lengagne le 4 août, devra essayer de résoudre.

BRETAGNE : Belle-Ile apprend à élever les poissons en cage

De notre correspondant

Vannes. — Il y a un an, REP-Marine, société ayant son siège à Nantes, s'installe à Port-Deuborch sur la commune de Sauzon à Belle-Ile-en-Mer (Morbihan). Elle a le soutien des comités locaux des pêches de Quiberon, de Belle-Ile et de l'Association des pêcheurs artisans du Sud-Bretagne.

Sur une surface de 1 hectare et par 20 mètres de fond, enfermés dans des cages en filets spéciaux de 15 mètres de long sur 10 mètres de large, douze mille cinq cents truites arc-en-ciel et quelques échantillons de turbots vivent et prospèrent là et ce, depuis le mois de mars, dans une eau dont la température oscille entre 8 et 13 degrés.

Ils sont surveillés par des plongeurs qui pénètrent à l'intérieur de cette immense nasse par un sas. Innovation également, un pipe-line sous-marin alimente directement ce cheptel sous-marin depuis le rivage par propulsion.

Cette expérience unique en France a été surveillée avec intérêt par une équipe du CNEXO de Brest.

A l'origine de cette expérience d'élevage sous-marin, un homme, M. Rodolphe Streichenberger. Passionné d'aquaculture, li s'est intéressé aux différentes expériences faites en ce domaine sur le littoral. Avec quelques amis, il a fondé cette société. Pour l'heure il est optimiste car les sites aquacoles ne sont pas nombreux, et, grâce à son procédé, ils peuvent être développés presque partout près du rivage.

Il fournit le matériel : reste aux propriétaires à y placer leurs poissons ou crustacés. D'ailleurs les pêcheurs du lac Léman lui ont passé commande pour installer ses enceintes sur le lac. Là, un élevage de truites et d'ombles chevaliers va être expérimenté. Ce dernier poisson a quasiment disparu du lac depuis environ une dizaine d'année, victime de la pollution. Le conseil général de Haute-Savoie a débloqué des crédits pour cette coopérative de pêcheurs et s'intéresse de près à l'initiative.

Et les inconnues ?

Jusqu'à présent la technique utilisée dans les vingt-six fermes aquacoles recensées sur le littoral breton et normand est identique : le poisson est élevé dans des cages immergées à quatre ou cinq mètres. Celles-ci sont relevées deux fois par jour pour l'alimentation des animaux. Trois cages aquacoles sont immergées à des profondeurs de vingt mètres : deux au Guilvinec et une à Concarneau (Finistère), mais les problèmes de nourriture restent difficiles car on doit opérer depuis la surface.

En 1980, la production française de truites arc-en-ciel était de 480 tonnes, dont la moitié en rade de Brest, fournie par le groupement des aquaculteurs du Ponant. Cent tonnes de saumons coho (saumon du Pacifique) ont aussi été produites en France. C'est la Norvège qui remporte la palme avec 12 000 tonnes en 1980 (il est vrai qu'elle bénéficie de sites exceptionnels avec les fjords).

Le développement de l'aquaculture (10 000 à 15 000 tonnes pourraient être produites uniquement en rade de Brest) permettrait d'intensifier la production de ces espèces nobles qui se vendent bien. L'année passée, les activités aquacoles ont représenté la deuxième source du déficit de la balance commerciale des produits de la mer. Elles représentent près de 19 % du déficit global, soit 500 millions de francs. Les progrès de la salmoniculture sont trop lents en France pour espérer résorber celui-ci rapidement.

Cette expérience d'aquaculture « off-shore » ne devrait pas rester à ce premier stade, aussi l'avenir dira si M. Streichenberger a su mettre en place un système fiable.

MICHEL LORET.

H.L.M. pour poissons dans le Languedoc

On fait bien des fleurs artificielles, des faux gazons, des hommes artificiels (des robots), des prothèses, des neiges artificielles, des mannequins pour le musée Grévin... Pourquoi pas des récifs artificiels ?

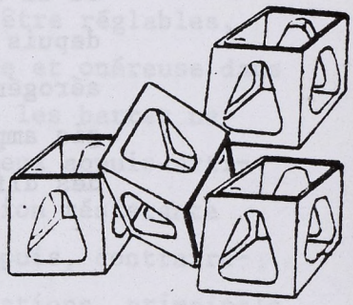
Car, de même que les hommes ont besoin d'un toit – manoir ou H.L.M. – de même les poissons ont besoin d'habitacles, de repères, de caches. Naturellement nombreuses dans la Manche et sur la côte atlantique, ces maisons sous-marines manquent cruellement sur le littoral languedocien de la Méditerranée, sableux et vaseux en profondeur. D'où l'idée d'y immerger des récifs artificiels pour que les poissons viennent y folâtrer à leur aise et y élisent domicile. Les experts ont en effet établi que les poissons éprouvent instinctivement le besoin d'être en relation avec un objet dans l'eau.

Des besoins de stimulus visuel (ombre, contraste), olfactif (secrétions des organismes fixés sur le récif), gustatif, physique ou physiologique (tourbillon, changement de pression), sans parler de l'« offre de logement, se manifestent chez les différentes espèces d'animaux marins, à des degrés divers. D'où l'idée de valoriser le littoral du Languedoc, sur le plan de la pêche, en offrant aux poissons qui y séjournent des « conditions optimales de fréquentation », comme on dirait dans le vocabulaire du marketing touristique...

C'est du Japon qu'est venue l'idée, lancée là-bas en 1954, dans le but de créer ou d'agrandir les terrains de pêche. En vingt-deux ans, 4,8 millions de mètres cubes de rochers, carcasses de voitures ou tramways, pneus ont été immergés.

1967 : la Compagnie générale transatlantique lance une expérience à Palavas-les-Flots. Sur 10 hectares, elle déverse par 21 à 23 mètres de profondeur des carcasses de voiture, des cubes et canalisations en béton, des pneus. Mais l'expérience sera de courte durée. D'autres formules furent tentées plus tard, par exemple à Port-la-Nouvelle, et se soldèrent là aussi par un échec.

C'est alors que sous l'impulsion du Cepralmar (1), qui dépend du Comité économique et social, et à la demande de plusieurs prud'homies de pêcheurs artisans (« les petits métiers ») de nouvelles études sont lancées qui viennent d'aboutir à un véritable plan d'action pour les années 1984-1985, dont l'animateur à Montpellier est M. Luc Hardy.



Dessin d'un récif artificiel.

Des H.L.M. pour poissons, pourquoi pas ? Mais il faudra que les pêcheurs et les océanologues veillent à ce que ne se développe pas dans ces grands ensembles sous la mer un « mal de vivre ».

FRANÇOIS GROSRICHARD.

(1) Centre d'étude et de promotion des activités lagunaires et maritimes en Languedoc-Roussillon.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

AEROTOR - GENERATEURS EOLIENS

Cette invention est fondée sur l'utilisation des bipyramides autotendantes appelées toupies. Elaborée collectivement, elle a été brèvetée au nom de D.Aubry, les Frères Breuillaud-Limondin, D.G.Emmerich et M.Roumégoux, le 4.6.1980 sous le N° 2.484.027. Après des essais concluants sur modèles effectués en soufflerie à Nantes, cette invention a été présentée au concours "Energie de demain" à Nancy, accompagnée de la note descriptive suivante:

Le renchérissement du pétrole et la crise de l'énergie consécutive rendent de nouveau actuelle l'utilisation du vent en tant que source d'énergie. Si la réalisation des éoliennes de petite dimension à usage individuel est depuis longtemps résolue à l'aide des hélices à pales, la réalisation des aérogénérateurs à grande échelle, lesquels pourraient fournir une masse d'énergie amplement suffisante pour suppléer au pétrole, présente jusqu'à aujourd'hui des difficultés non résolues.

Tous les projets de grandes éoliennes multipales (de 20 à 50 m de diamètre) qui ont vu le jour entre les années 1930 et 1970, et ce, quel qu'en soit le pays d'origine, ont tous, pour des raisons de résistance des matériaux, abouti à des échecs. Et c'est la crise énergétique actuelle qui a récemment relancé de nouvelles études en matière de "capteurs éoliens".

Certains programmes envisagent la construction de rotors d'environ 100 mètres de diamètre, capables de produire plusieurs mégawatts.

Tous ces aérogénérateurs sont conçus comme des hélices à axe horizontal, leur plan de rotation devant être orienté face au vent. D'où trois difficultés quasi insurmontables:

- les pales géantes, autant de consoles encastrées, aboutissent rapidement à la limite de résistance
- l'orientation permanente des rotors exigent des machineries lourdes et complexes
- l'ensemble, d'un poids excessif, nécessite une infrastructure passive très importante qui perturbe d'autant plus le régime du vent.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

C'est pourquoi seule une conception d'une géométrie spatiale peut aboutir à la réalisation des rotors géants. L'avantage d'une telle structure, dérivée d'un polyèdre plutôt que d'un disque planaire, est que, outre sa meilleure résistance aux déformations, une structure en volume n'a pas besoin d'être orientée en fonction du vent. De plus, la légèreté bien connue d'une construction tridimensionnelle rend l'infrastructure également plus légère.

Notre étude, qui a été poursuivie depuis un certain temps, expérimentalement sur des modèles réduits, a comme base l'utilisation des structures dites "autotendantes". Cette ossature extrêmement légère, qui en soi prête peu de résistance au vent, servira de support à des voilures formant des "ailes" qui actionneront l'ensemble. Evidemment, la surface de ces voiles, dont dépend la puissance du générateur, peut être, même à diamètre égal, considérablement plus grande que la surface porteuse d'une pale généralement effilée et oblongue. Ces surfaces, peuvent, en même temps, être réglables, ce qui n'est imaginable qu'avec une machinerie très complexe et onéreuse dans le cas des pales classiques. Dans cette solution technique, les barres ne travaillent plus en porte-à-faux, mais comme des barres à deux appuis articulés, ce qui permet de réduire d'emblée par quatre la section résistante d'où une économie de poids. De plus, les éléments à deux appuis, contrairement aux consoles, subissent incomparablement moins de vibrations, principale causes de la fatigue précoce des hélices jusqu'à maintenant expérimentées.

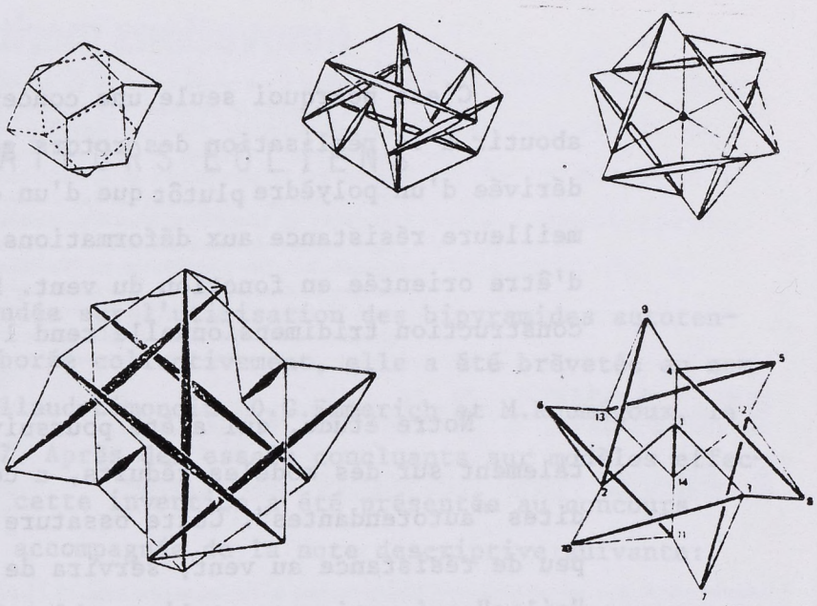
Par ailleurs, la forme polyédrique de ces structures permet l'accrochage de voilures à double courbure, de sorte que même en cas de changement de direction du vent, l'"AEROTOR" tourne imperturbablement.

Grâce aux autotendants, il est donc possible de concevoir des générateurs éoliens de grande dimension, capables d'alimenter tout une ville ou une région en énergie. On peut envisager également la production d'éoliennes individuelles en kit pour rendre un établissement autonome en énergie.

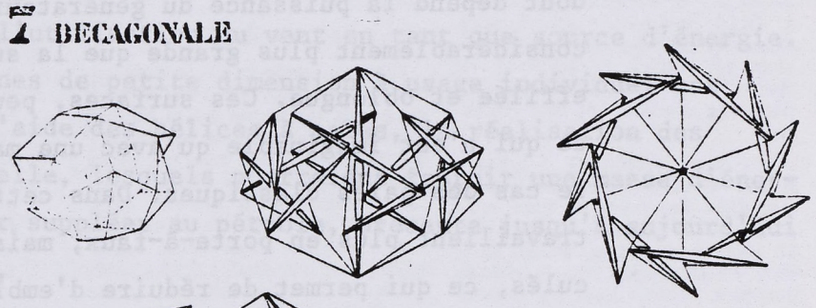
Six modèles différents et interchangeables étaient exposés à Nancy, actionnés par un ventilateur, illustrant les diverses formes et modes de fonctionnement. Ils n'ont pas retenu l'attention du jury.

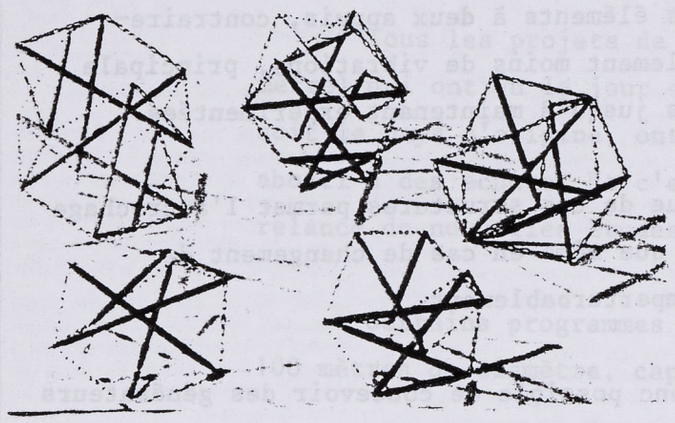
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

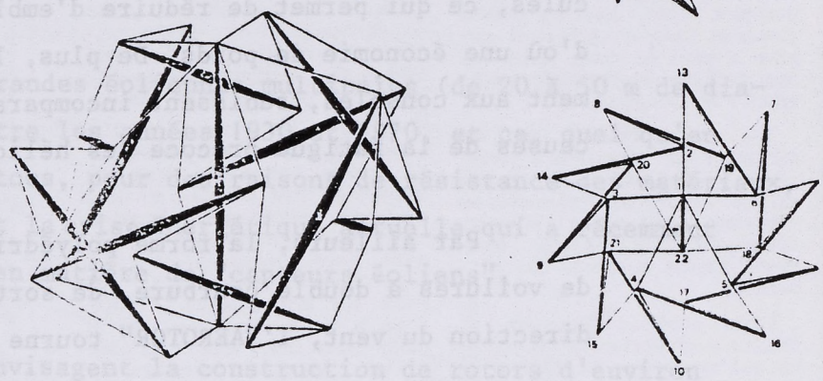
5 TOUPIE HEXAGONALE



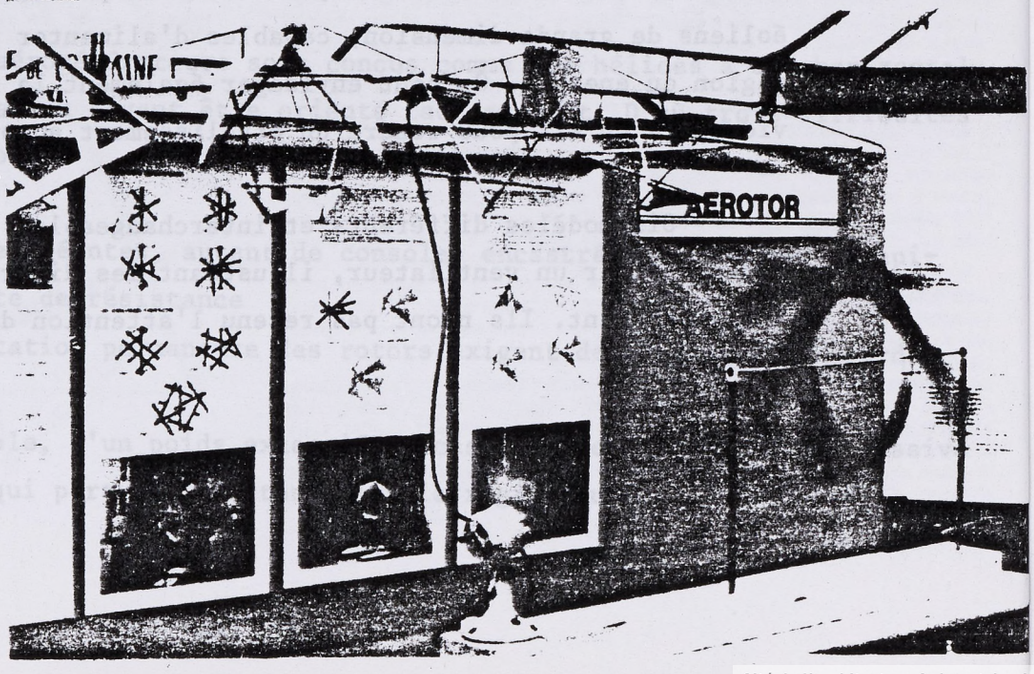
7 DECAGONALE







Ensembles équilibrés de toupis constitués de quatre, cinq, six et sept barres.



Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

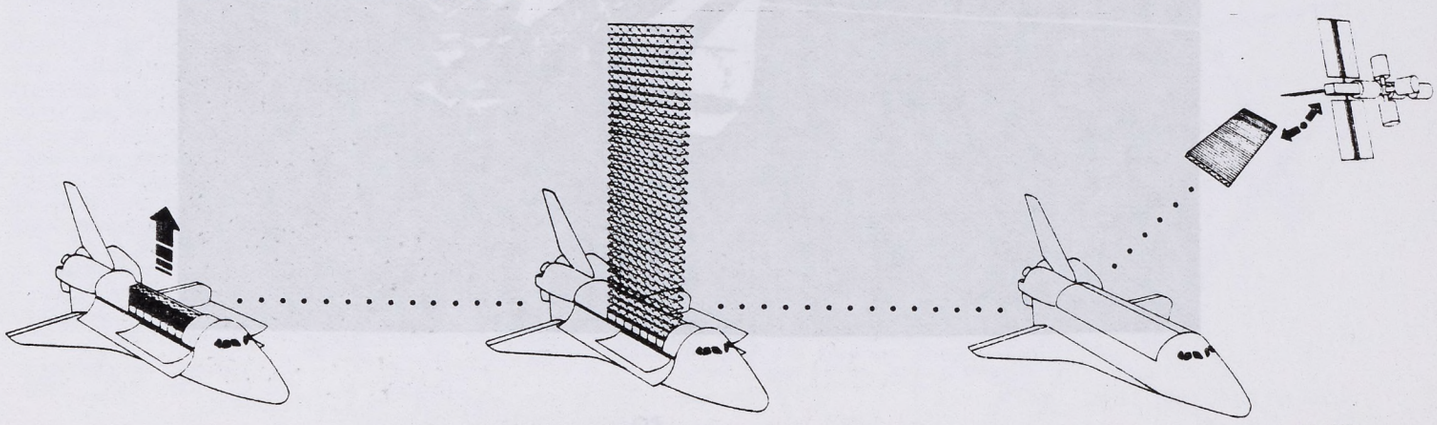
STATION ORBITALE

En deux décades l'astronautique est passée du stade de lancement de sondes de la taille d'un pamplemousse, pesant 1,5 Kg, au transport sur place par "navette" du type "challenger" de volumes habitables par une douzaine de personnes et pesant plusieurs dizaines de tonnes.

Ces satellites artificiels, dont le champ d'application n'est pas seulement militaire, représentent sans conteste la somme des technologies les plus avancées, bouleversant le domaine de la communication, météorologie, surveillance, etc. Leur développement plus large dans le domaine des autres sciences - biologie, métallurgie, pharmacie, etc. - est cependant bloqué par l'exiguité des volumes expédiables pour installer de véritables laboratoires comprenant des lieux de travail, d'habitat, de récréation... permettant un séjour normal.

Les capsules actuellement lancées ont des espaces plus proches d'un véhicule que d'un local réellement viable et ont provoqué, dans de nombreux cas, des effets pathologiques, physiologiques et surtout psychologiques sur les occupants qui y étaient enfermés pendant parfois plusieurs mois. Indéniablement, existe la nécessité de volumes plus importants aménageables, allant jusqu'à la construction d'établissements complets, adaptés à un séjour permanent et même de véritables villes extra-terrestres.

Les dimensions des lanceurs rendent impossibles, et pour longtemps, la mise sur orbite des objets volumineux, du moins au départ. D'où la nécessité de l'utilisation de constructions déployables, qui pendant le transport se présentent sous une forme compacte puis se déplient mécaniquement une fois arrivées à destination.



AA 237

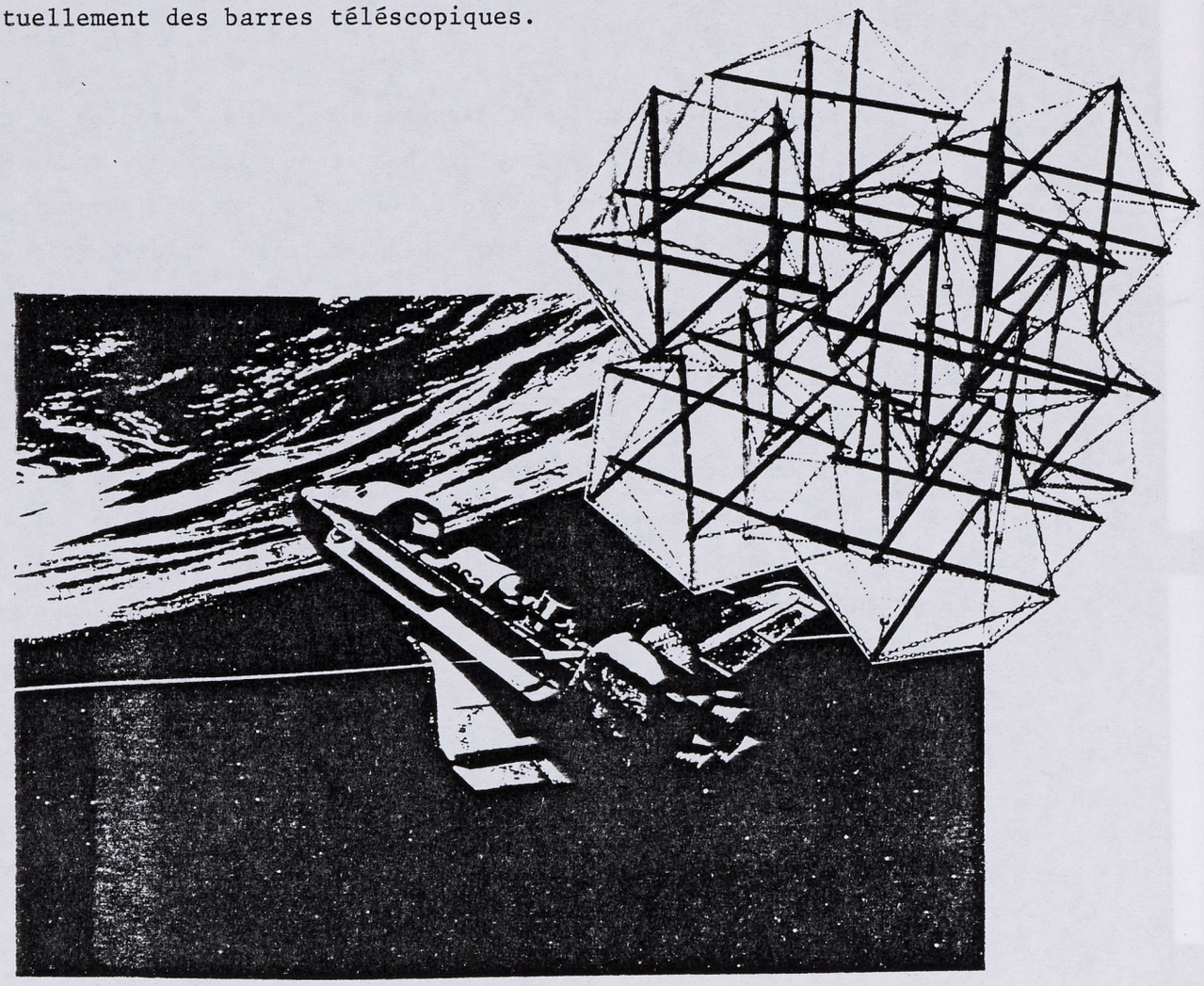
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Deux types d'agencement spatial peuvent être envisagés:

- des espaces de transition, constitués d'éléments délimitant une zone accessible avec scaphandre, permettant aux astronautes d'évoluer sans être attachés par un cordon ombilical à leur nacelle et sans risquer, cependant, de partir à la dérive à la suite d'un faux mouvement ou d'un dérèglement de l'appareil.

- des espaces entièrement viabilisés - étanches, pressurisés, oxygénés - assurant une vie normale; dans le cas de volumes de grande dimension, la construction en des zones ou couches multiples s'impose afin de limiter les dangers de brusque perforation des parois étanches par des débris.

Une opération d'assemblage classique est impossible dans ce milieu, même avec une structure tridimensionnellle ordinaire, faite élément par élément. Par contre, la plupart des réseaux autotendants peuvent être préassemblés, se refermer comme un parapluie en un faisceau compact puis s'ouvrir à l'aide de servomoteurs téléguidés, en manoeuvrant la longueur des tirants et éventuellement des barres téléscopiques.



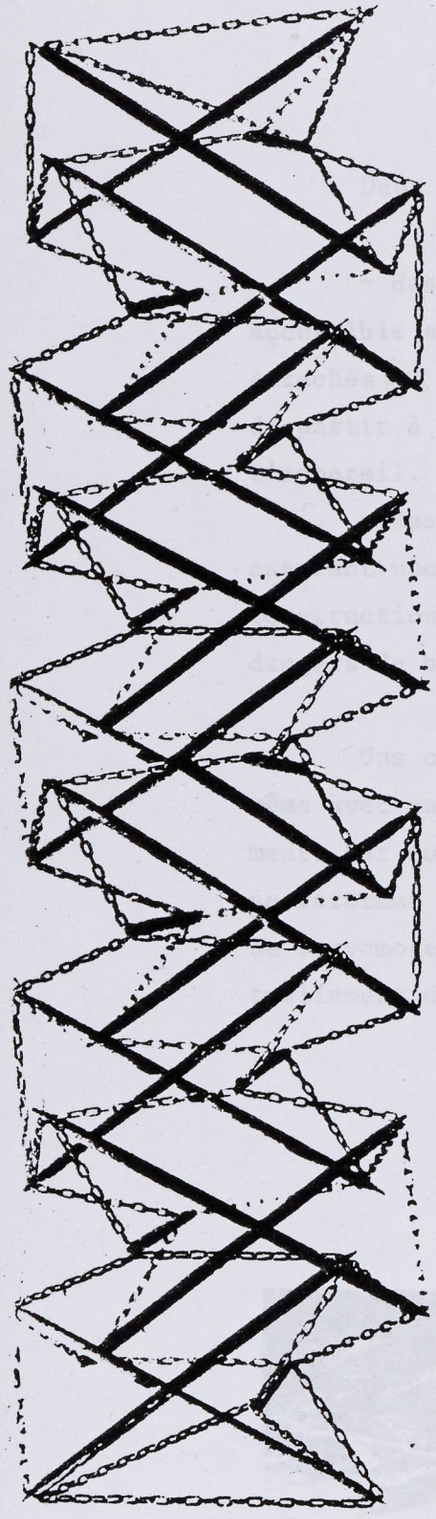
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

ANNEXES

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

D. G. EMMERICH

CONSTRUCTIONS AUTOTENDANTES



« ... Un corps est au repos si les forces le sollicitant sont en équilibre... le vecteur d'une force se définit par son intensité et sa situation dans l'espace... » Les cours de stabilité commencent par ces notions élémentaires, auxquelles est rituellement jointe la réserve du genre : « ... qu'on se limite dans ce qui suit à un système de forces situées dans le même plan ». Après les appuis, poutres, voûtes, fermes, ils abordent les ossatures en volume et ceci sans avoir jamais traité les systèmes de forces situées dans l'espace.

Alors il faut s'y prendre par des artifices : considérer un ensemble par plans perpendiculaires statiquement indépendants — transversal, longitudinal, horizontal — et encore reconsidérer ses contreventements autant de fois séparément et enfin le remplir d'une ou plusieurs structures secondaires autonomes, où chaque plan est inutile, pire : poids mort l'un pour l'autre. Et structure étant poids mort, l'inutile nuit.

Cette routine nuisible est le sous-produit du développement des mécanismes intermédiaires entre la pensée et l'œuvre, tels les expressions graphiques, les calculs graphiques, qui secrétaient finalement le plan-cellule, le projet-type en même temps que l'abaque universel. Le conformisme technique trouvait enfin une matière de choix. Contemporain surtout des guerres — lourd, sonore, thermoductile, incertain... mais excellent pour les travaux publics et militaires — le béton, brut et armé, venait se fossiliser comme une architecture moderne définitive au garde-à-vous, vers un angle droit... exprimant son temps comme tout art se doit.

Erigés en un jeu occulte, irresponsable et bureaucratique, ces syndromes conduisaient à l'aliénation de l'architecte, de l'ingénieur, à l'insuffisance de la production et à l'indigence plastique — bref — à l'antiarchitecture. A l'époque, c'était au fond l'idée de Dada : faire la grève de l'art pacotille. Mais toute grève devient stérile dès qu'elle a atteint son but, et contre l'antiarchitecture devenue orthodoxie, il faut pratiquer la vraie architecture, qui est : articuler l'espace, créer des structures, vaincre la pesanteur — celle des maîtres anciens, romains, gothiques, du XIXe siècle.

Le temps change avec ses évidences : l'armature se porte mieux sans béton ; les matières nouvelles isolent mieux ; une structure plus légère gagne à être flexible, et enfin s'il était plus facile de construire on construirait certainement plus. Et parce qu'en espace il est plus facile de construire qu'en plan, il convient de ne plus se limiter aux systèmes situés dans un même plan. Revenons donc à la statique.

Articuler l'espace.

Le plan se divise en polygones, l'espace en polyèdres. Le tétraèdre ici paraissait correspondre au triangle comme élément primitif indéformable, mais réguliers, ces tétraèdres ne sont pas empilables. Les réseaux tridimensionnels utilisent donc la combinaison octaèdre-tétraèdre, de la famille cristalline régulière.

Ces charpentes efficaces, standard, adaptables ont aussi leurs inconvénients ; des joints complexes où se rencontre un trop grand nombre de barres, travaillant indifféremment à la traction ou à la compression, l'hyperstaticité. Les calculer comme dalle pleine, supposer flexion et cisaillement là où il n'y a qu'effort axial est une hypothèse mais serait hérésie en cas d'une ossature libre. Il convenait donc de trouver d'autres solutions, quitte à abandonner l'a priori du tétraèdre et même tout le système régulier.

L'hypothèse de recherche était de supposer l'existence de structures stéréométriques minima, statiquement déterminées, composées de polyèdres aux nœuds desquels se rencontrent le moins de membrures possibles dont un minimum travaillant à la compression et toutes de nature connue. A noter qu'en principe, l'équilibre d'un point de l'espace se définit par quatre vecteurs.

Une configuration stable devait donc vérifier un groupe de relations invariables qui correspondent respectivement aux caractères de connectivité, continuité, orientabilité, convexité :

— Quatre vecteurs sont incidents à un sommet.

— Chaque vecteur est incident à un couple de sommets.

— Un vecteur par sommet est pousseur.

— Les segments de vecteur forment un graphe ferme.

Une telle configuration est un équilibrium autotendant construit de barres et de tirants, où poussées et tractions toutes connues s'équilibrent en écartant et solidarisant les éléments les uns aux autres. L'ensemble précontraint est comparable à un filet à provision tendu par un certain nombre de baguettes qui ne se touchent pas. Le plus simple de ces filets n'a que cinq mailles, six nœuds et trois barres. Il existe un nombre limité d'équilibriums élémentaires ou simplex autotendant ; mais on peut créer aussi par l'interpénétration de deux ou plusieurs équilibriums élémentaires identiques ou différents un équilibrium composite ou complexe autotendant.

La configuration de chaîne souple est le groupe de connexions minima nécessaires à l'érection d'un équilibrium ; elle est homéomorphe à un polyèdre convexe, la pyramide tronquée en général ou le prisme en particulier. Dans un simplex autotendant, la déformation topologique se caractérise par une rotation de la maille supérieure par rapport à la base. Le déplacement se produit selon l'orientation des pousseurs imbriqués, à droite ou à gauche, donnant deux solides énantiomorphes — lévogyre et dextrogyre — qui ne comportent ni plan ni centre de symétrie. Ces corps ont tendance à une action hélicoïdale et l'effet des sollicitations extérieures se traduit par une flèche de torsion.

Un équilibrium composite peut dériver de la combinaison de simplex d'orientation identique ou opposée ; par conséquence, l'action peut être cumulée ou compensée, partiellement ou totalement, le complexe est dans ce dernier cas racémique ou inactif.

Créer des structures.

Donc ces polyèdres possèdent des propriétés remarquables : semi-réguliers, dissymétriques, à isotropie axiale, doués d'un potentiel mécanique comparable au spin. Et précisément, ces propriétés mêmes rendent possible la construction d'ensembles solides où il n'existe aucune continuité entre les composants solides — ce qui paraît à première vue contraire au bon sens. Pourtant, on connaît les émulsions où des particules en suspension dans un milieu liquide donnent un état consistant. C'est ainsi que les barres restent en suspension entre les tirants formant une structure stéréométrique, statiquement déterminée, indéformable.

Ces briques assemblées — juxtaposées ou superposées selon les divers appareillages — constituent un ouvrage quelconque : mât, poutre, voûte, coupole, ossatures...

(Voir suite page XLV.)

Mât autotendant constitué des sous-ensembles à trois barres, qui peut être employé indifféremment comme poutre, point-d'appui, pont...

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

CONSTRUCTIONS AUTOTENDANTES (suite de la page XLII)

On peut organiser un réseau en mettant en contact tous les sommets des polyèdres, ou seulement une partie, ou de telle façon qu'aucun des sommets, par conséquent aucun élément rigide ne soit en contact. Les appareillages ou schémas combinatoires dérivent des tessellations ou équipartitions stéréométriques : régulières, semi-régulières, automorphiques, leurs duales, qui sont d'un nombre limité. Certains schémas possèdent même une dissymétrie propre, à effet tournoyant d'orientation gauche ou droite : propriété très précieuse, qui à son tour peut agir par interférence sur le pouvoir rotatoire inhérent aux polyèdres.

Il existe donc des ensembles autotendants à divers degrés de contact et de saturation, et qui sont à diverses classes combinatoires, animés de tourbillon de forces, celles-ci s'alternent et se compensent entre elles selon leurs situations respectives. On peut constater que manifestement un élément de situation peut avoir un effet mécanique, agir comme l'équivalent d'une force — devenir dimension.

Etant donné qu'il existe tout un registre d'éléments de situation, un groupe peut par conséquent avoir un nombre quelconque de dimensions ; trois dans le cas de la stricte symétrie. Les dimensions affectant nombre, espace, intensité et succession des éléments sont susceptibles de transformation ; une incidence peut se substituer à une ou plusieurs autres équivalentes, à condition que reste invariable le degré de symétrie indispensable au phénomène. De même, un système devient variable — extensible, rétrécissable — en jouant par alternance sur le registre des incidences. En outre, leur enrichissement ou différenciation par la substitution d'une incidence à plusieurs équivalentes peut rendre une structure plus immatérielle, plus légère.

Cependant, il est étonnant que depuis une cinquantaine d'années en particulier, la préférence aille au système orthogonal parfaitement symétrique et au gerbage de masses monolithiques.

Vaincre la pesanteur.

Dans une structure autotendante, la verticale n'est plus une direction préférentielle et la gravitation perd son rôle de vecteur dominant. Elle n'est même plus indispensable, d'autant plus que le poids de la structure représente une force quasi négligeable par rapport à sa cohésion, et de toute façon les forces au lieu de se cumuler en descente de charge, se répartissent et se compensent dans toutes les directions. Le flambage collectif est absent, seules les barres unitaires y restent sujettes.

Les précédents concepts énoncent les éléments d'une théorie de la stabilité spatiale et quelque peu dynamique, en établissant le principe qu'un ensemble de corps est en situation stable si les forces le sollicitant produisent des déséquilibres contrôlés. Cela étant applicable aussi aux structures non stéréométriques. Ces principes ne seraient au fond que l'extension de concepts analogues, déjà généralisés dans tous les domaines de la science moderne.

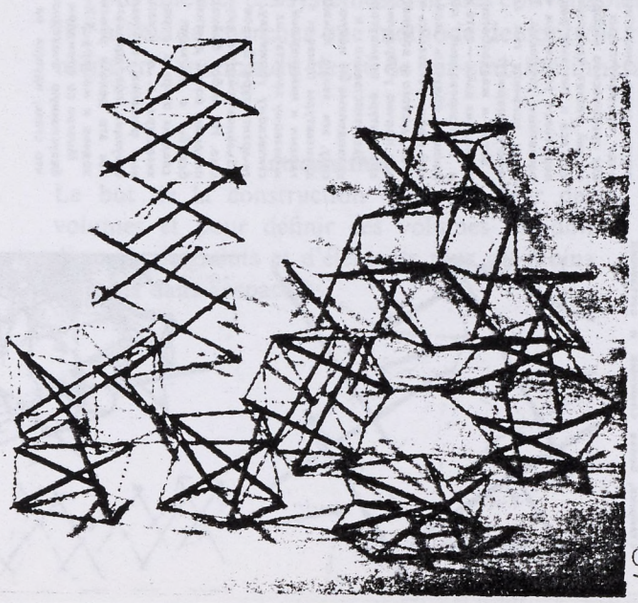
Depuis les découvertes fondamentales de Pasteur sur la dissymétrie moléculaire en 1860, il est devenu notoire que toutes les manifestations de la vie minérale ou organique proviennent d'un défaut quelconque de symétrie. Dans le domaine de la physique nucléaire, Pierre Curie constate : « Ce qui est necessaire, c'est que certains éléments de symétrie n'existent pas. C'est la dissymétrie qui crée le phénomène. » Et en mécanique ondulatoire, d'après Louis de Broglie, une particule matérielle ne peut être caractérisée sans « son spin, son moment de rotation propre ». Ces études s'inspiraient de ces exemples et d'autres dans la mesure même où notre ignorance l'a permis, donc beaucoup et pas assez.

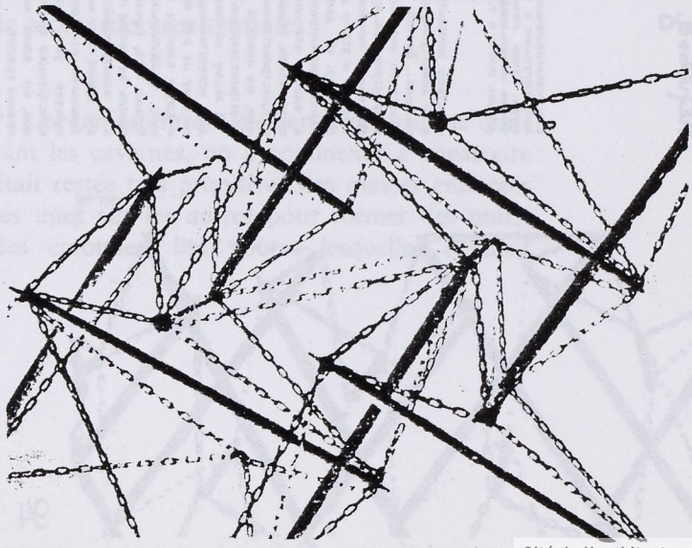
Une structure peut être réalisée avec des barres et des tirants isolés ou par solides préassemblés. Il est possible aussi de proceder de telle façon qu'on établisse toutes les connexions sauf une par équilibrium, obtenant ainsi un ensemble collapse en un amas organisé qui s'ouvrira comme un accordéon au cours du montage final. D'ailleurs elle peut être conçue de manière à devenir mobile, extensible ou déformable même sans démontage par l'allongement ou le raccourcissement des tirants ou des barres. Ces éléments peuvent être pour les uns câble, chaîne, corde, tige..., les autres en métal, bois, plastique, bambou, d'un profilage constant ou d'une inertie variable... Leur assujettissement ne demande aucun joint particulier, les tirants s'orientent naturellement dans le sens de l'effort.

L'application de ces structures a des possibilités aussi variées que leurs formes, donc d'un nombre pratiquement illimité. Elle peut se présenter comme une charpente dense pour envelopper un volume quelconque ou au contraire comme des mailles assez grandes pour servir d'habitation individuelle, en bande, en collectif..., offrant ainsi un gros œuvre léger, prêt à recevoir des aménagements, séparations, etc., et qui est solide au point d'être transportable, insensible aux séismes. Outre le bâtiment, elle intéresse évidemment les autres domaines de la construction, ponts, télécommunications, transports..., et naturellement, elles sont réalisables même sans industrie lourde.

Les études présentées ont l'illusion d'être protégées par plusieurs brevets.

D.G. EMMERICH.



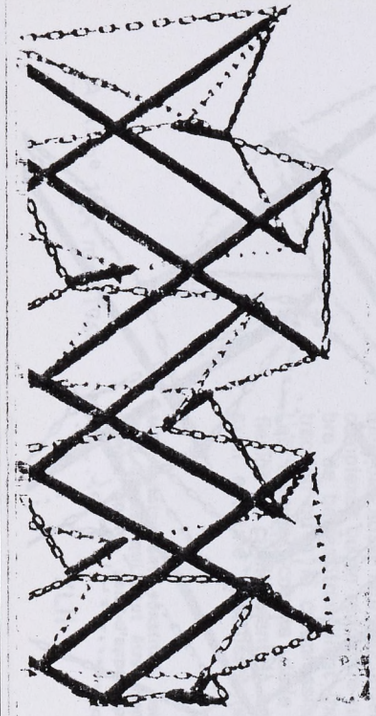


Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

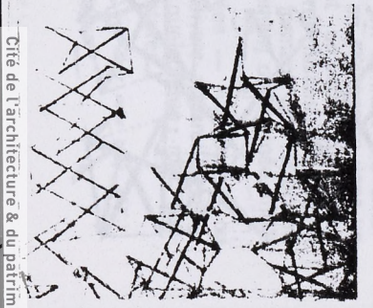
Современная Архитектура .5
l'architecture d'Aujourd'hui 1964
перевод с французского.

САМОНАПРЯЖЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Д. Ж. ЭММЕРИХ (D. G. EMMERICH)



Самонатягивающаяся мачта, образованная фигурами с тремя сжатыми стержнями. Такая конструкция может быть также использована в качестве балки, опоры, моста и т. д.



Деталь и общий вид нескольких самонапряженных неизменяемых систем: простейших, более сложных и составных

«...тело находится в состоянии покоя, если действующие на него силы уравновешены... Вектор каждой силы определяется по интенсивности и положению в пространстве...» С этих элементарных сведений начинается курс статики. Обычно к этому добавляют следующую оговорку: «В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением сил, действующих в одной плоскости». После изучения опор, балок, сводов и ферм переходят к пространственным каркасным системам, но никогда не рассматривают их пространственную работу.

К этому вопросу приходится подходить искусственным путем и расчленять систему на ряд перпендикулярных друг к другу плоских конструкций: поперечных, продольных и горизонтальных. Кроме того, приходится отдельно учитывать ветровые нагрузки на каждую из этих конструкций; затем дополнять все это одной или несколькими вспомогательными конструкциями, для которых каждая уже рассмотренная плоская конструкция является не только ненужной, но даже мертвым грузом — она только вредит.

Такая порочная традиция является следствием использования (при претворении идеи в конкретные произведения) ряда промежуточных действий, таких как графическое изображение и графический расчет, сводящих в конце концов все к типовым решениям, плоским первичным элементам и универсальным расчетным графикам. Техническая косность получила тем самым необходимую поддержку.

Бетон и железобетон — современники последних войн,— хотя и тяжелые звуко- и теплопроводные материалы, позволяющие получать элементы произвольной формы, оказались подходящими для гражданского и военного строительства; они прочно утвердились в современной архитектуре прямоугольных коробок.

Безответственно и бюрократически возведенные на некую мистическую высоту, эти явные признаки заболевания архитектуры привели к утрате архитекторами и инженерами своего значения, к низкому качеству их творчества, к пластическому убожеству, коротко — к анти-архитектуре. В свое время дадаисты объявили бойкот всему косному в искусстве. Но любой бойкот становится бесплодным после достижения цели и для борьбы с догмами анти-архитектуры следует открыть дорогу подлинной архитектуре, т. е. искать пространственные решения, создавать новые конструкции, преодолевать силы тяготения, как это делали римские и греческие зодчие и мастера XIX века.

Многое со временем утрачивает свою безусловную очевидность: оказывается, что сталь, идущая на арматуру, работает лучше без бетона; новые материалы обладают более высокими изолирующими свойствами; легкие конструкции более выгодны благодаря их гибкости; ведь строили бы больше, если бы было легко сооружать здания из бетона и железобетона.

Поскольку пространственные конструкции легче, чем плоские, не следует ограничиваться плоскими системами. Возвратимся теперь к вопросам статики.

РАСЧЛЕНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА

Плоскость может быть расчленена на полиэдры, плоские многоугольники, пространство — на многогранники. Тетраэдр в пространстве казалось бы соответствует треугольнику на плоскости, как простейший и неизменяемый правильный многогранник; однако тетраэдры не могут быть сложены без зазоров между ними.

Поэтому в пространственных стержневых системах используют комбинацию октаэдров с тетраэдрами, относящимися к числу правильных кристаллов.

Такие типовые эффективные и легко применяемые пространственные стержневые системы обладают своими недостатками; сложные узлы соединения большого числа стержней работают одинаково хорошо на кручение, растяжение и на изгиб. Рассчитывать эти системы как плиту, предполагать изгиб и растяжение там, где имеются только осевые нагрузки, не только неразумно, но и просто нелепо в случаях сквозного решетчатого каркаса. Следовало найти другие решения, хотя бы ценой отказа от априорного использования тетраэдров и даже от любой правильной системы.

Рабочая гипотеза состояла в том, что признавалась возможность существования пространственных статически определимых систем, состоящих из многогранников с узлами, в которых сопрягается минимально возможное число стержней, из которых наименьшее число работает на сжатие. Следует напомнить, что при этом устойчивое положение точки в пространстве определяется четырьмя элементами (стержнем и оттяжками).

Устойчивая конфигурация должна была подтвердить ряд неизменных зависимостей, отвечающих соответственно признакам связи, непрерывности, положению в пространстве, выпуклости:

четыре элемента сходятся в одной вершине многогранника;

каждый элемент связывает две вершины многогранника;

один из элементов передает вершине усилие;

элементы образуют неизменяемые системы.

Такая фигура является самонапряженной неизменяемой системой, состоящей из сжатых и растянутых элементов, в которых силы сжатия и растяжения уравновешены, они раздвигают и вместе с тем связывают отдельные элементы. Такую предварительно напряженную систему можно сравнить с сеткой для продуктов, растянутой некоторым числом распорок, не соприкасающихся между собой. Простейшая из таких сеток состоит только из пяти треугольников, шести узлов и трех сжатых стержней. Существует ограниченное число таких элементарных неизменяемых и самонапряженных фигур, но путем сочетания двух или нескольких таких простейших фигур, одинаковых или разных, можно получить сложные уравновешенные и самонатягивающиеся системы.

Пространственный контур из гибкой цепи является минимально необходимым составным элементом для создания уравновешенной системы; он образует выпуклый многогранник и является в общем виде усеченной пирамидой и в частном случае призмой. В простейшей самонапряженной системе деформация характеризуется поворотом верхнего треугольника по отношению к основанию. Направление поворота влево или вправо зависит от взаиморасположения сжатых стержней распорок, образующих по две неизменяемых несимметричных фигуры. Перемещения узлов происходят по спирали.

Сложная уравновешенная система может быть создана путем сочетания элементарных фигур с аналогичным или противоположным взаиморасположением сжатых стержней-распорок; в связи с этим их деформации кручения могут складываться, частично или полностью погашаться.

СОЗДАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Таким образом, эти многогранники обладают замечательными свойствами, они полурегулярны, асимметричны, изотропны, обладают механическими свойствами, которые можно сравнить со спином[1]. Как раз эти-то свойства и позволяют создавать устойчивые системы, в которых жесткие элементы не связаны непосредственно между собой, что на первый взгляд противоречит здравому смыслу. Но ведь известны эмульсии, где взвешенные в жидкости частицы образуют устойчивую консистенцию. Так и сжатые стержни-распорки, подвешенные между растянутыми элементами, образуют пространственную неизменяемую и статически определимую структурную систему.

Такие сборные системы, установленные рядом или друг на друга, могут быть использованы в любых сооружениях, образуя мачты, балки, куполы или каркасы. Можно образовать решетку путем соединения между собой всех или только части вершин многогранников таким образом, чтобы ни один сжатый элемент не был соединен между собой.

[1] Спин — собственный механический момент количества движения элементарной частицы.

Сложные системы, т. е. схемы сочетания в разных комбинациях, отличаются в зависимости от того, состоят ли они из правильных или неправильных многогранников, использованы ли все элементарные фигуры неповторяющихся форм или парные, число которых ограничено. Некоторые из таких схем могут обладать индивидуальной асимметрией с поворотом влево или вправо; свойство это чрезвычайно ценное, которое под влиянием как бы интерференции может влиять на стремление к кручению, свойственное таким многогранникам.

Могут существовать, следовательно, самонапряженные системы с разными видами соединения, с разной плотностью пространственной решетки, относящиеся к разным схемам сочетания; они находятся под действием сложной игры сил, действующих в разных направлениях и погашающих друг друга в связи с взаиморасположением в пространстве. Можно утверждать, что каждая элементарная фигура может служить автоматическим устройством, оказывать действие, равнозначное действию силы, определять все размерности.

Может существовать большое разнообразие таких пространственных фигур, каждая из них может состоять из элементов разных размеров; симметричные фигуры состоят из элементов трех размеров. Размеры элементов, от которых зависят их количество, положение в пространстве и последовательность расположения, могут быть изменены; наклонное положение элемента может быть заменено другим или рядом других положений при условии, что сохранится степень симметрии, необходимая для таких образований. В связи с этим такая система может быть переменной, она становится то более плотной, то более разреженной путем чередования элементов с разными наклонами.

Кроме того, увеличением числа элементов путем замены единого наклона элементов несколькими эквивалентными можно создать более сквозную, более легкую конструктивную систему.

Достойно удивления, что вот уже пятьдесят лет, как отдают особое предпочтение прямоугольным, правильным и симметричным системам и нагромождению одних массивных объемов на другие.

ПРЕОДОЛЕТЬ СИЛУ ТЯГОТЕНИЯ

В самонатягивающихся конструкциях вертикаль не является основным направлением и сила тяготения теряет значение преобладающего вектора. Ею можно даже пренебречь, тем более, что вес конструкций является силой, ничтожной по сравнению с силой затяжки, обеспечивающей неразрывность конструкции и во всяком случае вес в таких конструкциях не накапливается книзу, а распределяется во всех направлениях и взаимно погашается. Продольный изгиб всей системы отсутствует, его испытывают только сжатые стержни-распорки.

Все изложенное относится к теории пространственной устойчивости, в известной мере связанной с динамикой, в которой устанавливается, что система тел находится в устойчивом состоянии, если действующие на нее силы вызывают контролируемое нарушение равновесия. Эта теория применима также и к непространственным системам. Эти принципы по существу являются только развитием аналогичных положений, общих для всех областей современной науки.

После основополагающих открытий Пастера (Pasteur) в 1860 г. в области асимметрии молекул стало очевидно, что все явления органической и неорганической жизни являются следствием того или иного нарушения симметрии. В области ядерной физики Пьер Кюри (Pierre Curie) установил: «Необходимо, чтобы была в какой-то степени нарушена симметрия. Основой каждого явления служит асимметрия». В теории волновой механики, по мнению Люи де Брольи (Louis de Broglie), материальная частица не может быть охарактеризована, если не знать «ее спина» и присущего ей момента вращения. В данных исследованиях мы руководствовались этими и другими подобными примерами в этой области.

Конструкции могут быть осуществлены из отдельных сжатых и растянутых элементов или из объемных элементов. Возможно также, собрав все узлы каждой фигуры, кроме одного, получить подготовленные к установке конструкции, которые при окончательном монтаже можно будет расправить, как гармошку. Такие конструкции могут быть осуществлены как изменяемые, растягиваемые или деформируемые без демонтажа путем удлинения или сокращения сжатых или растянутых элементов. Растянутые элементы могут быть из тросов, цепей, канатов или стержней, сжатые элементы из металла, дерева, пластмассы или бамбука, постоянного или переменного сечения. Сборка не требует никаких сложных соединений, поскольку растянутые элементы сами принимают положение в соответствии с направлением сил.

Применение таких конструкций может быть столь же разнообразным, как разнообразны их формы, т. е. практически неограниченно. Они могут иметь вид сплошных конструкций любого объема или, наоборот, сетчатых с достаточно крупными ячеями и применяться в индивидуальных блокированных и многоквартирных домах в качестве легких несущих конструкций, в которых нетрудно применить любую планировку, любое деление на помещения и т. д. Они достаточно прочны для условий транспортировки и сейсмостойки. Кроме гражданского строительства они могут быть использованы в строительстве мостов, телевизионных башен, в транспортных сооружениях и, понятно, для их изготовления не нужны крупные промышленные предприятия.

Настоящие исследования, если не ошибаюсь, находятся под охраной нескольких патентов.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

International Conference on Space Structures 1966
Department of Civil Engineering, University of Surrey

Réseaux

D. G. EMMERICH
Ingénieur H.I.T., Architecte D.P.L.G., Paris

'Space is nothing without matter' said Leibnitz. Indeed, if space is the common domain where things are situated, space without things is indefinable. Thus, it must be furnished. If it is made according to a certain order, the relative position of the elements themselves define geometrical space.

Starting from the most simple distribution, it is possible to build linear, planar, spatial and even hyperspatial spaces following the number of co-ordinates of the reference-system—the chosen rule of the game. These more or less complex constructions then can be used as combination patterns for real structures.

By a topological analysis, it is possible to establish the stability rules for different kinds of frameworks, having a deformable, static or even hyperstatic geometrical shape. The two last-mentioned classes are stable even with articulated joints—therefore the corresponding structures are capable of assembly without being made 'monolithic' by mechanical fixation.

In order to calculate these articulated systems, appropriately composed then in hyperstatic principle, there is need to find a method of control reflecting the gain in security by a dimensional reduction related to the degree of hyper-stability inherent in space structures.

'L'espace n'est rien sans la matiere' disait Leibnitz. En effet, si l'espace est le lieu commun ou les choses se situent, l'espace sans les choses est indefinissable. Il faut donc le meubler. Si on le fait selon une certaine règle, la position des éléments même définit un espace géométrique.

Partant de la distribution la plus simple, on construit des espaces lineaires, planaires, spatials et même hyperspatials suivant le nombre des coordinnées du système de référence—la règle du jeu—choisi. Ces constructions plus ou moins complexes peuvent alors servir comme schémas combinatoires pour des structures matérielles.

Par une étude topologique il est possible d'établir des lois de stabilité des divers réseaux qui peuvent avoir une composition géométrique déformable, statique ou même hyperstatique. Ces deux dernières classes sont stables même avec des joints articulables—donc les structures correspondantes sont assemblables sans monolithisme par des attaches mécaniques.

Pour calculer ces systèmes articulés convenablement composés donc en principe hyperstatiques, il y a lieu de chercher une méthode de contrôle reflétant les avantages de securité par un allegement en fonction du degré de sur-stabilité inherante aux structures spatiales.

Introduction

Le but de la construction' c'est de créer des volumes et pour définir ces volumes on doit disposer de points et d'éléments plus ou moins éloignés dans l'espace.

L'organisation des éléments, dépuis que quittant les cavernes, on a commence à construire était restée très primitive; des masses entassées les unes sur les autres pour former des murs, des colonnes, des voûtes lesquelles tenaient

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

ensemble essentiellement grâce à la gravitation. Béton armé et acier n'ont changé que la dimension des éléments qui restent superposés en un amas vaguement liaisonné. Évidemment plus cet amas est lourd et bas mieux il se maintient à moins qu'une force majeure à son inertie ne le renverse . . .

Cependant les materiaux légers et de haute résistance ne sont guère mis en valeur, ou même sont gaspillés, si on ne leur fait qu'imiter des amas ne tenant ensemble que grace à la gravitation, donc avec une préference pour le penpendiculaire. Et perpendiculaire signifie en statique dissocié, non-collaborant. Mais les constructeurs paraissent ignorer ces évidences et depuis plus de 50 ans les soi-disants modernes se sont tournés résolument vers la reinacrnation du "balloon frame" en béton, verre, métal . . . Même dans les écoles au lieu d'enseigner comment former des structures on déforme plutôt la structure mentale:

" . . . Un corps est au repos si les forces le sollicitant sont en équilibre . . . le vecteur d'une force se définit par son intensité et sa situation dans l'espace . . . " les cours de stabilité commencent par ces notions élémentaires auxquelles est rituellement jointe la réserve du genre: " . . . qu'on se limitera dans ce qui suit à un système de forces situées dans le même plan". Après les appuis, poutres, voûtes, fermes ils abordent les ossatures en volume et ceci sans avoir jamais traité les systèmes de forces situées dans l'espace.

Alors il faut s'y prendre par des artifices: considérer un ensemble par plans perpendiculaires statiquement indépendants—transversal, longitudinal, horizontal—et encore reconsidérer ses contreventements autant de fois séparément et enfin le remplir d'une ou plusieurs structures secondaires autonomes, ou chaque plan est inutile, pire: poids-mort l'un pour l'autre. Et structure étant poids-mort l'inutile nuit. Après une telle scholastique honni soit qui bien y pense.

Pourtant si on y pense bien: construire sans rien d'autre que de contreventements, c'est le but—concevoir des structures cohérentes entre toutes leurs composantes, donc infiniment plus éfficaces, constituées d'elements standard légers, et assemblables sans gros engin ni maîtrise. C'est la seule possibilité de trouver le racourci technique vers l'abondance des logements et autres bâtiments et c'est seulement sur la base des relations stéréométriques qu'il est possible de concevoir de telles structures, car en espace il est plus facile de construire qu'en plan. Il convient donc de ne plus se limiter aux systèmes situés dans un même plan. Mais qu'est donc l'espace?

L'espace est le lieu commun dans lequel les choses sont situées. L'espace général—le milieu—n'a pas de dimension à priori; son étendue, comme celle du temps est indéfinie.

La dimension est une création artificielle pour faciliter l'enregistrement des phénomènes dans l'espace général qui en soi n'est pas perceptible. Ce sont les choses ou plutôt leurs positions qu'on aperçoit réellement. Le temps même n'est autre que la succession d'événements intervenus dans la position des éléments.

Pour enregistrer ces positions—c'est à dire la forme—il faut choisir des repères, un système de coordonnées, tout comme dans le temps on enregistre les événements par rapport à un calendrier ou un horaire. Les repères dans l'espace sont des récipients, sorte de boites, sphères, casiers . . . Le système le plus fréquent est la boite indiquée par trois axes. Évidemment, suivant la commodité on peut choisir tout autre système—ou règle de jeu—pour repérer des formes, dont l'ensemble est en soi l'espace.

On entend donc par la notion d'espace tout ensemble dans lequel on peut définir des éléments ou points voisins et entre lesquels on peut mesurer une distance. Cette définition est indépendante de la nature des éléments qui peuvent être d'une manière équivalente des points, des courbes, des surfaces, des vecteurs, des champs . . . et elle implique qu'on peut distinguer divers systèmes ou géométries de l'espace, parce qu'une infinité de dimensions peut être choisie. Mais, heureusement, sinon on n'en finirait jamais, il est préférable de construire avec des éléments identiques et régulièrement répartis.

Il faudrait donc d'abord explorer la morphologie des équipartitions, ensuite étudier leur comportement cinétique en vue de développer des chemins de calcul qui tiennent compte du degré de l'indeformabilité ou hyperstaticité des structures.

Equipartitions

Structures ouvertes

Faire l'équipartition c'est découper en parties identiques un espace—lineaire, planaire, en

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

volume—suivant une règle choisie. Par exemple, une règle de jeu très simple: répartir en plan des éléments identiques de telle façon que la situation de chaque élément soit homologue.

Par convention, chaque élément soit symbolisé par des points ou des anneaux circulaires de diamètre égal. Ainsi deux points en relation tangente forment un voisinage: chaque point est voisin d'au moins trois autres points, et au maximum de six autres points. Une chaîne de points se refermant en un cycle forme un groupe de voisinage, qui se compose d'un certain nombre de points chiffrés: 3, 4, 6, 8 ou 12 appellé le chiffre du groupe.

Chaque point d'une distribution est contenu à la fois dans un nombre G de groupes de voisinage. Il existe un nombre V de voisinages entre les points des dits groupes, qui ensemble constituent un sous-ensemble ayant au total un nombre P de points. En énumérant, par leur chiffre suivant le sens des aiguilles d'une montre, tous les groupes de voisinage contenant un point quelconque, on obtient une collection de chiffres qui est le code caractéristique de l'ensemble. Par exemple: 3 4 6 4. Comme l'ensemble est planaire, on applique la formule d'Euler pour définir la relation entre les groupes, voisinages et points. La formule prend l'expression suivante:

$$G - V + P = 1$$

Il existe en tout onze distributions planaires à incidences répétitives appelées automorphes où chaque élément occupe une situation homologue par rapport aux autres. Elles sont représentées par les figures 1 à 11 et dans le tableau 1. A remarquer l'absence du groupe de code 5. La tentative d'en créer une équipartition donne un intéressant arrangement combinatoire, dont l'ambiguité démontre aussi l'inconsistance (figure 12).

Tableau 1. Sous-ensembles planaires

	Code	*G*	*V*	*P*
Réguliers	3 3 3 3 3 3	6	12	7
	4 4 4 4	4	12	9
	6 6 6	3	15	13
Semi-réguliers	3 3 3 4 4	5	12	8
	3 3 4 3 4	5	12	8
	3 3 3 3 6	5	13	9
	3 4 6 4	4	13	10
	3 6 3 6	4	14	11
	4 8 8	3	17	15
	4 6 12	3	19	17
	3 12 12	3	24	22

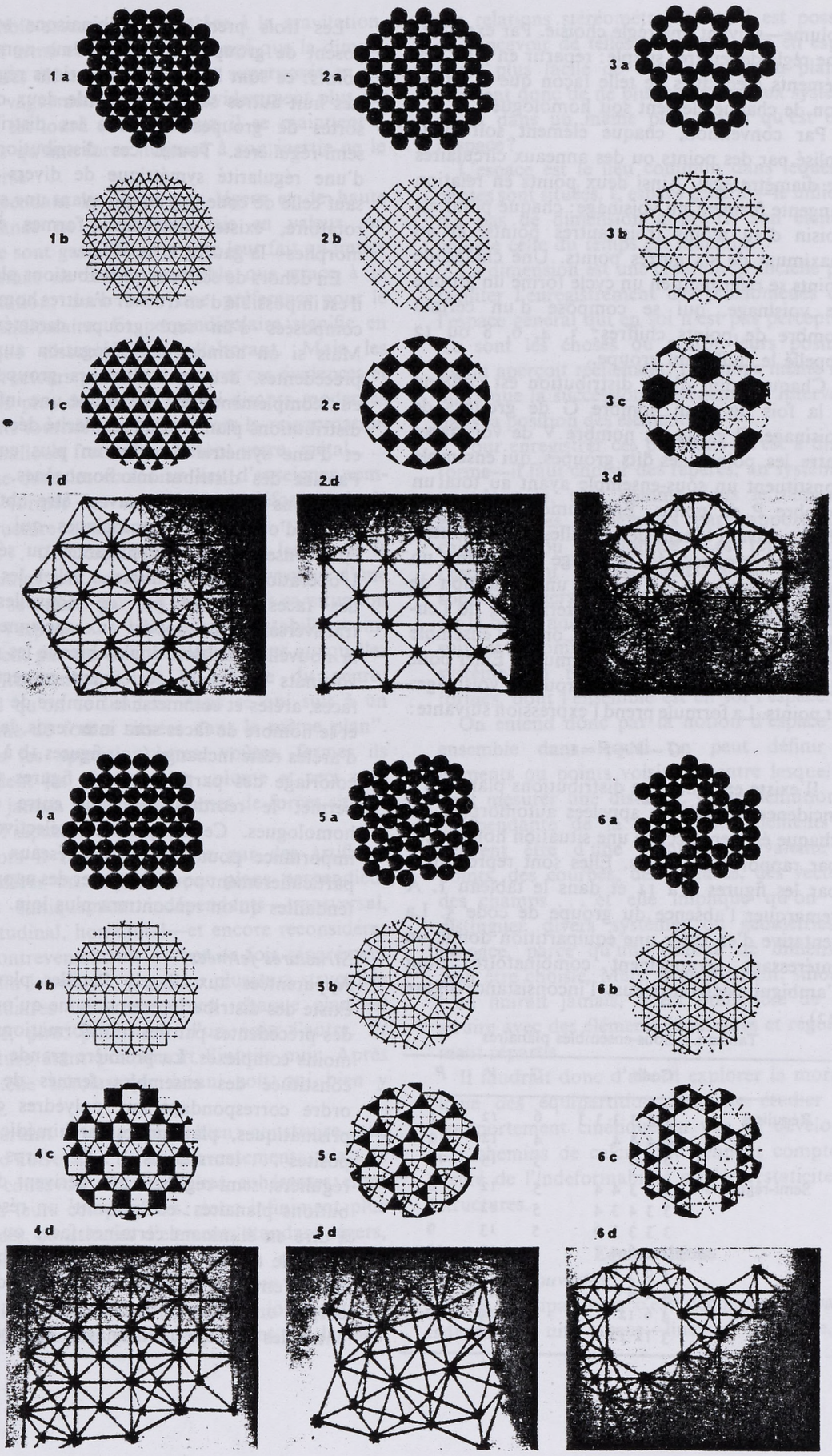
Les trois premières combinaisons se composent de groupes ayant le même nombre de points: ce sont les trois distributions régulières. Les huit autres se composent de deux ou trois sortes de groupes: ce sont les distributions semi-régulières. Toutes ces distributions sont d'une régularité symétrique de divers ordres, sauf celle de code 33336, qui ayant une symétrie rotatoire, existe sous deux formes énantiomorphes—la gauche et la droite.

En dehors de ces onzes distributions planaires, il est impossible d'en trouver d'autres homogènes, composées d'un seul groupe caractéristique. Mais si on admet, par dérogation aux règles précédentes, deux ou plusieurs groupes entre eux complémentaires, on trouve une infinité de distributions planaires de régularité décroissante et d'une symétrie de plus en plus complexe. Partant des distributions homogènes, les distributions hétérogènes peuvent être obtenues à l'aide d'operations topologiques qui peuvent être conservatives, enrichissantes ou sélectives. L'opération duale consiste à relier les centres des faces voisines par de nouvelles arêtes transversales par rapport aux anciennes. Dans la nouvelle partition duale obtenue les groupes, voisinats et points deviennent respectivement faces, arêtes et sommets; le nombre de sommets et le nombre de faces sont intervertis, le nombre d'arêtes reste inchangé (voir figures 1b à 12b). Le coloriage des partitions (voir figures 1c à 12c) permet le réordonnancement entre éléments homologues. Cette opération sélective a son importance pour alléger des réseaux ou plus particulierement pour composer des nappes autotendantes qu'on rencontrera plus loin.

Structures fermées

Apparentées aux diverse familles planaires, il existe des distributions en volume qu'on obtient des précédentes par des transformations plus ou moins complexes. La première grande classe est constituée des ensembles fermés de premier ordre correspondant aux polyèdres convexes: prismatiques, platoniques, archimédiens, composites . . . leurs duals . . . Ces corps convexes réguliérs, semi-réguliérs etc. dérivent des distributions planaires: en 'pincant' un réseau, c'est à dire en éliminant certaines faces ou en diminuant le nombre de leurs côtés on obtient une série d'enveloppes polyèdriques Pour définir ces corps, on utilisera les précédentes relations entre les groupes, voisinages et points d'un

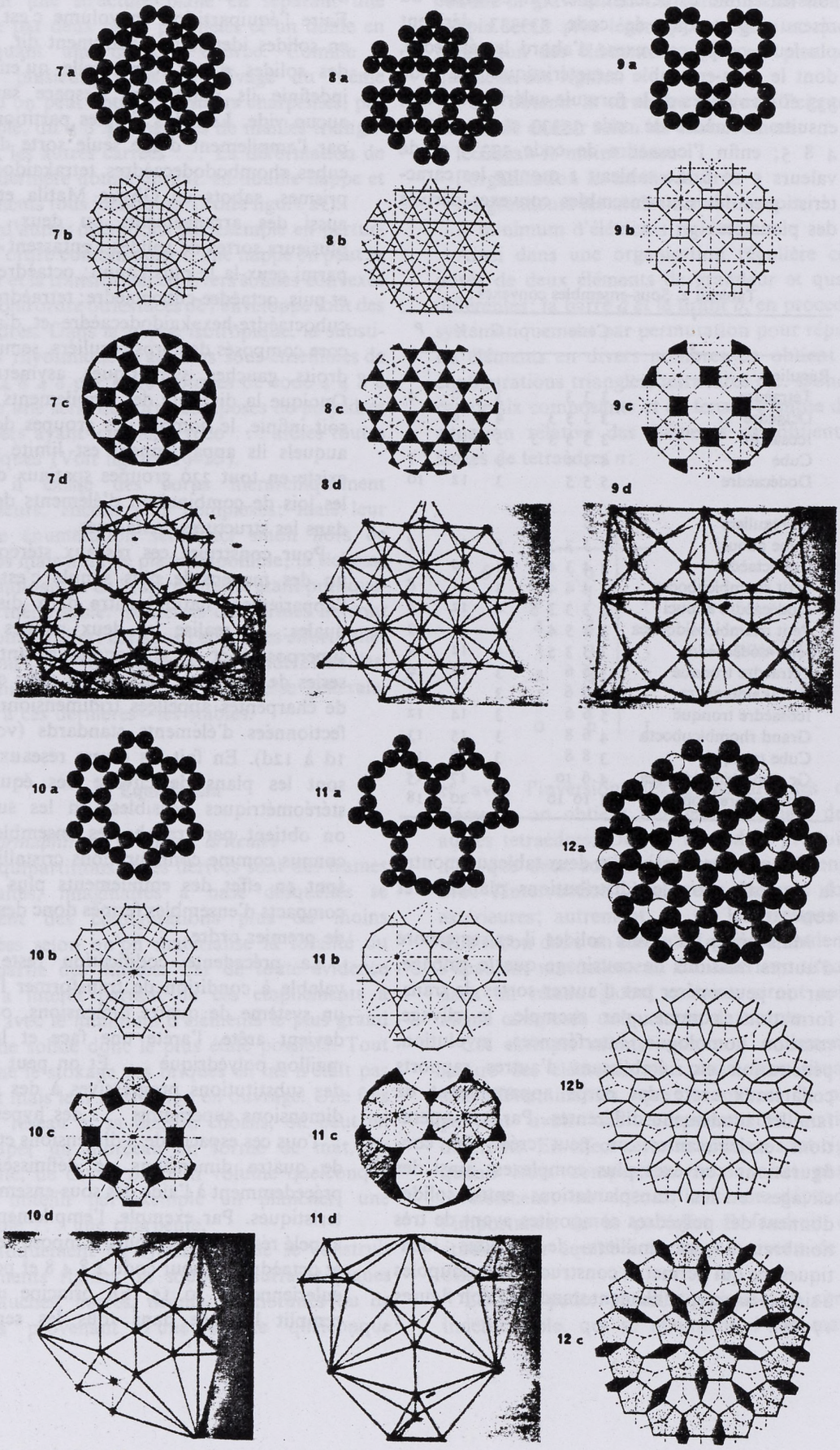
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE



Figures 1a–12a. Equipartitions planaires.

Figures 1b–12b. Tracés des réseaux planaires duals.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE



Figures 1c–12c. Chromatisme pour réordonnacement

Figures 1d–11d. Charpentes à double nappe duale.

Q68

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

sous-ensemble caractéristique. Par exemple, du réseau isotropique de code 333333 dérivent plusieurs corps convexes; d'abord le tétraèdre, dont le sous-ensemble caractéristique a le code 333 et les valeurs de la formule eulérienne 3 6 4; ensuite l'octaèdre de code 33333 et de valeurs 4 8 5; enfin l'icosaèdre de code 33333 et de valeurs 5 10 6. Le tableau 2 montre les caractéristiques des sous-ensembles convexes dérivés des planaires.

Tableau 2. Sous-ensembles convexes

	Code	*G*	*V*	*P*
Réguliers				
Tétraèdre	3 3 3	3	6	4
Octaèdre	3 3 3 3	4	8	5
Icosaèdre	3 3 3 3 3	5	10	6
Cube	4 4 4	3	9	7
Dodécaèdre	5 5 5	3	12	10
Semi-réguliers				
Cube adouci	3 3 3 3 4	5	11	7
Cuboctaèdre	3 4 3 4	4	10	7
Petit rhombicubocta	3 4 4 4	4	11	8
Dodécaèdre adouci	3 3 3 3 5	4	12	8
Petit rhombicosidodéca	3 4 5 4	4	12	9
Icosi-dodécaèdre	3 5 3 5	4	12	9
Tétraèdre tronqué	3 6 6	3	12	10
Tetrakaidécaèdre	4 6 6	3	13	11
Icosaèdre tronqué	5 6 6	3	14	12
Grand rhombicubocta	4 6 8	3	15	13
Cube tronqué	3 8 8	3	16	14
Gr. rhombicosidodéca	4 6 10	3	17	15
Dodécaèdre tronqué	3 10 10	3	20	18

L'étude comparative des deux tableaux montre la parenté entre les distributions planaires et convexes.

Mais entre les divers solides il existe encore d'autres relations de cousinage que le galbage, car on peut opérer par d'autres sortes de transformations comme, par exemple, le clivage, rotation homologue, interférences, involution, pénétration etc. établissant d'autres rapports collatéraux entre des corps apparemment de familles totalement différentes. Par ces operations enrichissantes, on peut créer des configurations convexes plus complexes; ainsi des clivages et les transplantations entre solides donnent des polyèdres composites ayant de très nombreuses—des milliers—de facettes identiques, ce qui permet la construction de coupoles à simple nappe par élément standard (Voir figures 17–18).

Structures d'ordre supérieur

Faire l'équipartition en volume c'est découper en solides identiques; autrement dit, assembler des solides d'une forme telle qu'en quantité indefinie ils remplissent l'espace sans laisser aucun vide. Les plus simples partitions se font par l'empilement d'une seule sorte de solides: cubes, rhombododecaèdres, tetrakaidodécaèdres, prismes, sabots de Ghyke Matila etc. Il y a aussi des arrangements ou deux, trois, ou plusieurs sortes de solides s'entassent ensemble; parmi ceux-la le plus connu: octaèdretetraèdre; et puis, octaèdre-cuboctaèdre; tetraèdre tronqué-cuboctaèdre-hexakaidodecaèdre et d'autres encore composés de corps réguliérs, semi-reguliers, droits, gauches, symétriques, asymétriques . . . Quoique la diversité des empilements compacts soit infinie, le nombre des groupes de symétrie auquels ils appartiennent est limité à huit: il existe en tout 230 groupes spatiaux définis par les lois de combinaison d'éléments de symétrie dans les structures cristallines.

Pour construire ces réseaux stéréométriques un des moyens le plus simple c'est d'utiliser l'appariement naturel entre deux distributions duales: on realise les deux nappes planaires superposées et les diagonales reliant les deux series de sommets. On obtient ainsi onze séries de charpentes appellées tridimensionnelles confectionnées d'éléments standards (voir figures 1d à 12d). En fait les divers réseaux planaires sont les plans de clivage des équipartitions stéréométriques possibles; en les superposant on obtient par tranche les ensembles ouverts connus comme configurations cristallines et qui sont en effet des empilements plus ou moins compacts d'ensembles fermés donc des polyèdres de premier ordre.

La précedente codification reste là aussi valable à condition de transformer l'espace en un système de quatre dimensions, ou le point devient arête, l'arête une face et la face un maillon polyèdrique . . . Et on peut passer par des substitutions progressives à des espaces de dimensions supérieures . . . des hyperespaces.

Tous ces espaces de *n*-dimensions et ainsi ceux de quatre dimensions de définissent comme précedemment à l'aide des sous-ensembles caracteristiques. Par exemple, l'empilement compact appelé réseau isotropique, composé de tetraèdres et octaèdres, a pour code 4 8 4 8 et pour valeurs euleriennes 4 20 15. En principe un système remplit l'espace dans tous les sens; on en

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

obtient une structure plane en séparant une nappe par deux plans parallèles et un dôme en pratiquant une découpe courbe. Comme il existe plusieurs plans de clivage du même réseau on peut obtenir plusieurs charpentes, par exemple, du 4 8 4 8 les unes de mailles triangulaires, les autres carrées . . . La déformation de cette dernière donne un P.H. en double nappe et d'éléments tous identiques (Voire figure 21).

Pard'autres opérations par exemple en perturbant l'ordre combinatoire d'une nappe on peut la galber et la transformer en divers solides convexes de second ordre ou les faces de l'enveloppe sont des polyèdres. Dans la nappe isotropique, la substitution rhythmique de certains sous-ensembles de code 4 8 4 8 par leurs isotopes de code 4 4 8 8 donne une serie de corps composes de polyèdres réguliérs ayant 420, 840, 1680 . . . arêtes toutes identiques (Voir figures 19–20).

Et il existe des corps hierarchiquement supérieurs, encore plus complexes; mais leur simple énumeration serait ici sinon hors de propos mais hors de place disponible; la richesse morphologique de la stéréometrie étant pratiquement inépuisable. Toutefois ces formes ne sont pas toutes utiles: car sous l'effect des efforts elles peuvent etre déformables ou indéformables. L'architecture évidemment s'intéresse généralement à ces dernieres—les stables.

Equilibrium

Indéformabilite des réseaux articules

Les équipartitions et les dérivés sont des trames abstraites, imaginaires à base desquelles se réalisent des configurations plus ou moins saturées selon qu'on matérialise la totalité ou une partie des mailles. Car de toute évidence il y a intérêt partant de ces empilements à créer avec le minimum d'éléments le plus grand volume solide donc le plus étalé possible. Tout comme le stokage des briques en tas n'était pas le but mais leur répartition en ouvrage. Une fois notre réseau et sa densité choisis, on peut en découper un morceau en forme de mât, de tranche, de cavité ou d'un volume quelconque pour obtenir par exemple un plancher, une coupole . . . une charpente.

Pratiquement un système solide se construit d'éléments rigides ou souples; surfaces planes ou gauches, barres, tirants, membranes ou de forces provenant d'une source quelconque comme la gravitation. On admet qu'un élément souple serait plus léger qu'un rigide et que la connexion des éléments souples est plus aisée que celle des rigides.

Pour obtenir la structure la plus efficiente, il faut donc choisir selon les circonstances:

le réseau le moins dense
l'organisation la moins saturée
les grandeurs les moins nombreuses et
le minimum d'éléments rigides.

Ainsi dans une organisation régulière composée de deux éléments de grandeur et qualité différentes: la barre *a* et le tirant *b*, en procedant systématiquement par permutation pour répartir les éléments en divers nombres on obtient des configurations triangles, tetraèdres etc. Donc en cas de six composants et en tenant compte de la situation rélative des éléments on obtient 11 sortes de tetraèdres *n*:

	a	*b*	*n*	
6	6	0	1	
	5	1	1	
	4	2	2	
	3	3	3	11 possibilités
	2	4	2	
	1	5	1	
	0	6	1	

et avec l'inversion des grandeurs des deux éléments on obtient une gamme duale de 11 autres tetraèdres. Des 22 tetraèdres produits il n'ya que deux solides, les autres le deviennent avec l'intervention d'une ou plusieurs forces extérieures; autrement dit en les groupant de telle façon dans un ensemble qu'ils se tendent ou s'épaulent mutuellement. Suivant leur situation dans un réseau global certains seront solides même composés uniquement de tirants.

Cet exemple montre que non seulement la nature des éléments mais aussi leur situation sont déterminantes, que le tout et la partie peuvent avoir des comportements statiques différents. En effect certains réseaux sont rigides quand leurs composants ne le sont pas, et inversement; ou encore la tenue dépend de l'importance de la parcelle. Il faudrait donc étudier leur équilibre à chaque niveau de leur dissection.

La plus petite parcelle typique—ou simplex indéformable, qui se maintient d'une manière

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

autonome, donc indépendant aussi bien du sol que de la gravitation—s'appellera équilibrium. Si le réseau, par consequent la maille, est régulier l'équilibrium est une structure minima. Du point de vue formel il peut être plus ou moins complexe donc composé de sous-ensembles caracteristiques qui à leur tour sont composés d'éléments rigides ou souples.

En somme construire comme l'indique d'ailleurs le préfixe est une activité d'assemblage. Une construction par définition est le contraire du monolithe: c'est un ensemble, donc nécessairement articulé d'une multitude d'éléments liés en un système d'un seul tenant et de plus stable.

La stabilité d'un édifice dépend de l'indéformabilité géométrique de sa forme et de la résistance physique de ses matériaux. Donc l'esprit du compositeur y contribue autant que les propriétés des matériaux, puisque c'est lui qui choisit la forme.

Évidemment dépuis le quasi désintéressement des architectes pour toute autre forme que le cube—avec ses poétiques angles droits éminemment déformables—seule subsistait la résistance pour conférer à la structure une stabilité toute rélative.

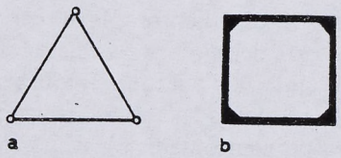
Des lors parler avec onction de formes utiles et fonction est futile. Des formes il en existe d'innombrables: plusieurs formes pour la même fonction ou la même forme pour plusieurs fonctions. L'important c'est de savoir choisir—les stables.

Exprimées dans un tableau il existe quatre possibilités extrêmes de stabilité (S) suivant que soit la forme (F_0) soit la matière est bonne (1) ou mauvaise (0).

F_0	M	S
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

On voit que seule la combinaison d'une bonne forme et d'un bon matériau donne une construction stable, sinon aussi excellente que soit la résistance on retombé, comme la plupart du temps, dans le monolithisme—le contraire de la structure.

Ainsi un triangle formé de trois barres est un équilibrium stable—même avec des joints articulables, mais un carré n'est stable qu'avec

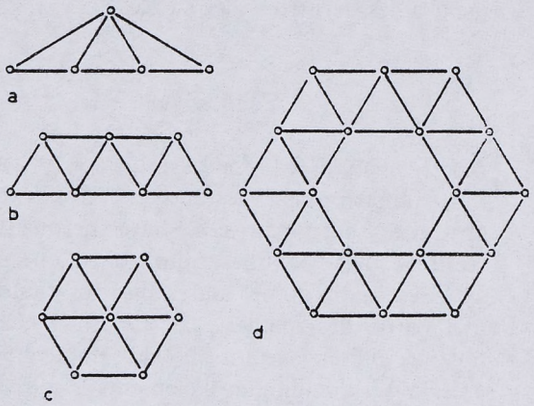


Figures 13a–13b. Simplex élémentaires.

encastrements en tant que cadre, d'ou une rélative lourdeur, comme le montre les figures 13a–13b. En fait le constructeur ne connait plus que ces deux figures et si d'aventure il voudrait en savoir davantage ne trouve rien ou pire se heurte à des formules fausses: car officiellement la science de l'ingénieur d'aujourd'hui ignore tout de l'espace. Pourtant on ne peut pas construire du solide avec des lois qui ne tiennent pas debout—ni parler de la forme sans connaître le fond—l'indéformabilité.

Structures planaires

D'après les règles actuelles un système planaire constitue d'éléments rigides et de noeuds articulés serait déformable sauf composé totalement de triangles en chaîne ou en cycles fermés: seules les charpentes semblables aux figures 14a–14d seraient donc indéformables, tout en restant sujet de déversement.



Figures 14a–14d. Treillis triangulés.

Dans ces ensembles, le triangle étant le plus simple équilibrium autonome il joue le rôle du simplex, ou sous-ensemble caractéristique et la relation entre faces et arêtes y sera en cas de chaîne simple:

$$F=\frac{A-1}{2}$$

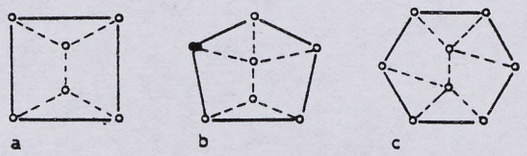
En cas d'un systeme triangulé en forme d'anneau simple ou multiple où C est le nombre

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

des cycles fermés, donc O en cas de rosace, la formule sera:

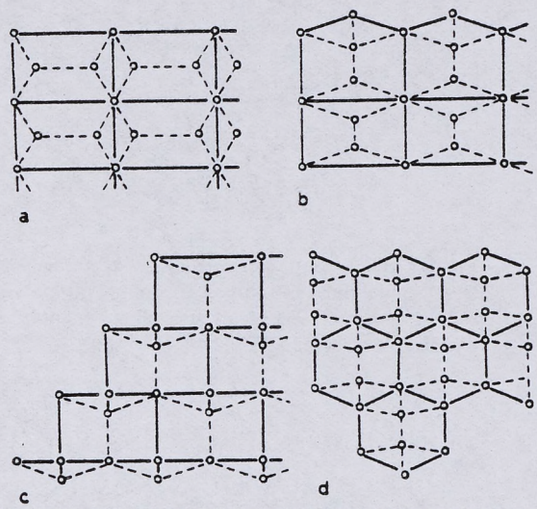
$$F=\frac{A}{2}+C$$

Mais en flagrante contradiction avec la règle il existe d'autres systèmes planaires avec des joints articulables et même avec des membrures non rigides, qui ne sont triangulées ni entièrement, ni même d'une manière continue et sont pourtant indéformables aussi bien en plan qu'en espace. Ils sont représentes sur les figures 15a–15c les éléments rigides marqués de traits pleins, les flexibles de discontinus.



Figures 15a–15c. Equilibriums planaires complexes.

Ces équilibriums étant indéformables, donc équivalents aux triangles du point de vue constructif, peuvent être juxtaposés en chaîne, cycles ou même en solides. Ainsi les ossatures



Figures 16a–16d. Ossatures planaires à joints articulés.

représentées sur les figures 16a–16d sont indéformables tout en étant constituées de bielles avec joints orientables et de cables—mais sans complète triangulation ni contreventement!

Mais, nouvelle surprise: en cherchant la relation topologique des faces et des arêtes on constate que les précédentes formules à l'origine déduites des triangulations restent toujours valables; bien que ces configurations se composent aussi d'autres polygones que le triangle. Elles vérifient donc l'indéformabilité de toute structure planaire et ainsi entre autre celle des triangulées. En effet les configurations planes dont les sous-ensembles sont construits d'un nombre impair d'arêtes, d'une manière disparallèle et qui sont douées d'un certain degré de dissymétrie sont indéformables. C'est ce qu'on pourrait appeller la règle des trois 'dis': disparité, disparallelité et dissymétrie.

Structures stéréometriques

Ces principes restent valables pour les espaces de dimensions supérieures c'est à dire ou les trois entités fondamentales: noeud, segment et région ont une complexité supérieure à celle du point, arête et face.

Cependant la seule formule connue par les ingénieurs pour juger l'indéformabilité d'une ossature en volume vient également de la triangulation: un système en espace composé de barres rigides et de noeuds articulés n'est indéformable qu'entièrement triangulé; donc la relation entre les sommets (S), arêtes (A) et faces (F) verifie la formule d'Euler et d'autre part, chaque face se définit par trois arêtes et chaque arête par deux faces:

$$S-A+F=2$$

$$F=\tfrac{2}{3}A$$

d'ou

$$A=3S-6$$

Seulement en croyant que toute ossature est strictement indéformable si $A=3S-6$, déformable si $A<3S-6$ et hyperstatique si $A>3S-6$ on ignore que cette loi n'est valable que pour le cas particulier des corps convexes et de premier ordre, et que le caracteristique eulerien c—ici 2—change suivant les propriétés topologiques des formes, selon leur connectivité; et si le nombre des connexions est k la formule générale sera:

$$S-A+F=2-k$$

Ainsi en cas d'un corps triangulé du genre d'anneau simple la formule sera $A=3S$, d'ou économie de six barres par rapport à un solide convexe; et dans le cas général de surfaces riemaniennes supérieures de connectivité k, tels des anneaux multiples où des nappes de

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

second ordre composées de polyèdres (Voir figures 19–21), la formule sera:

$$A = 3S + 6k$$

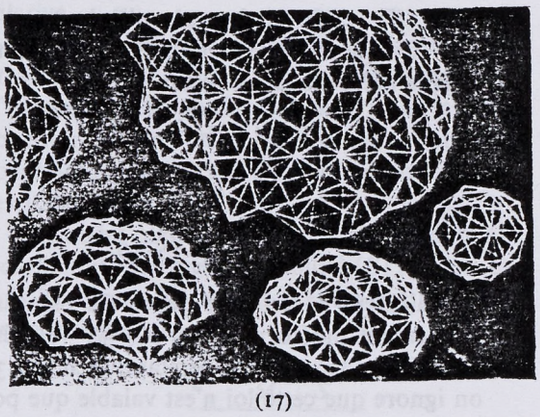
Mais en respect de la règle des trois dis on peut composer également des solides plus complexes ou le nombre relatif des segments rigides diminue davantage donnant des corps dans lesquels le rapport entre volume bati et matière est sans précédent. Par exemple une charpente en forme d'équilibrium autotendant, tout en étant non triangulée mais topologiquement convexe, est strictement indéformable avec seulement une membrure rigide sur quatre donc la relation entre membres rigides et souples sera:

$$A_r = \frac{S}{2}, \qquad A_s = \frac{3S}{2}$$

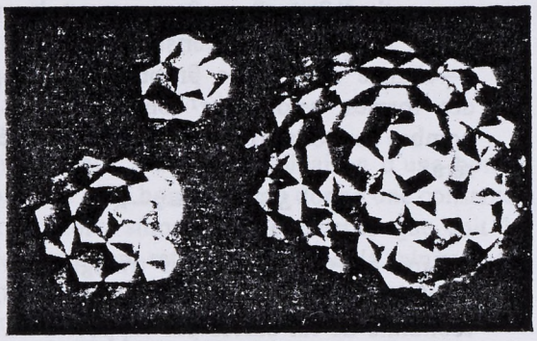
et

$$A = A_r + A_s = 2S$$

ce qui est bien loin de la valeur $A = 3S - 6$ de la formule en honneur. De plus si on assemble ces corps—en chaîne, cycle, nappe . . . —les formules dégressives correspondant au système sont à appliquer d'ou une économie de membrures supplémentaire (Voire figures 22–25).



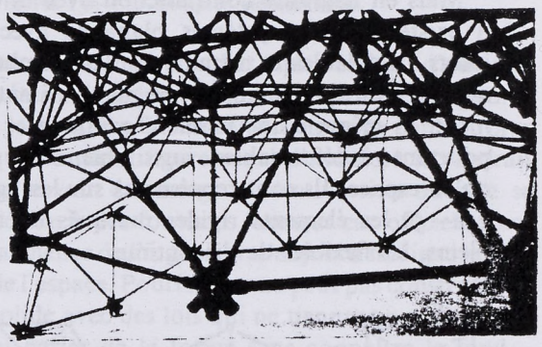
(17)



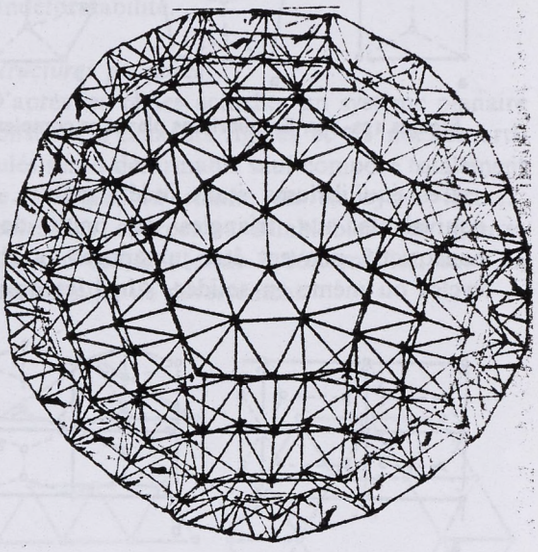
(18)

Figures 17–18. Polyèdres composites dérivés des équipartitions convexes de premier ordre; dômes construits comme charpentes ou comme parois autotendantes.

Ces polyèdres autotendants possèdent des propriétés remarquables: semiréguliers, dissymétriques, à isotropie axiale, doués d'une flèche rotatoire comparable au spin. Et précisement, ces proprietés même rendent possible la



(19)



(20)

Figures 19–20. Coupole isotropique à double nappe de très grande portée, composée comme un polyèdre de second ordre à 1680 arêtes strictement identiques. Vue d'ensemble et détail.

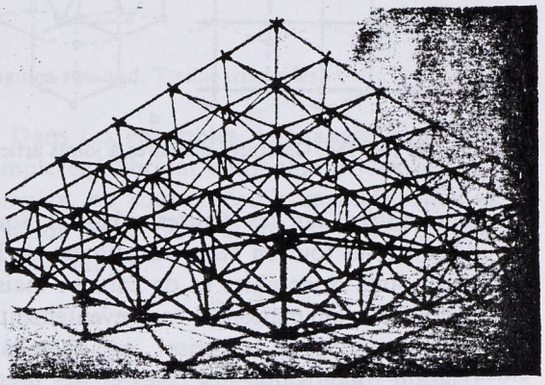
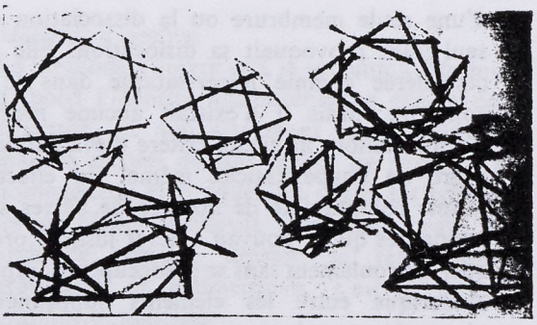
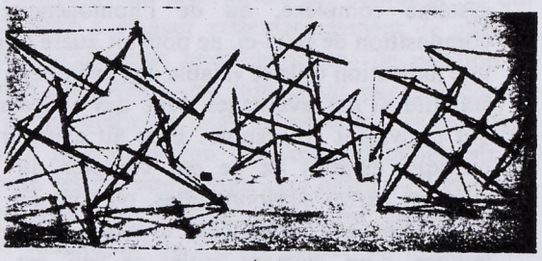


Figure 21. Paraboloide-hyperbolique à double nappe isotropique construite de barres de longueur unique.

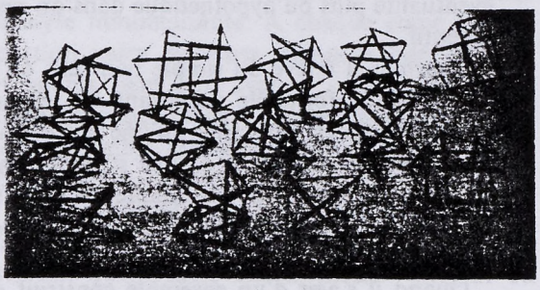
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE



(22)



(23)



(24)

Figures 22, 23 et 24. Divers équilibriums et réseaux autotendants pouvant servir comme une charpente dense pour envelopper un volume ou comme des mailles assez grandes pour être habitables.

construction d'ensembles solides ou il n'existe aucune continuité entre les composants solides—ce qui paraît à première vue contraire au bon sens. Pourtant il s'agit de solides de forme particulière ou le sens des forces internes ne varie pas donc connu d'avance quelque soit la direction ou l'intensité des forces externes: ce qui permet de réaliser les membrures sans ambiguité de sens. En fait une telle structure orientée se décompose en deux groupes isolement déséquilibrés mais complémentaires, étant inverses et meme inversibles: les barres pouvant se substituer aux tirants et vice-versa. C'est ainsi que les barres restent en suspension entre les tirants formant une structure autonome statiquement déterminée, indéformable ou la verticale cesse d'être une direction préferentielle et la gravitation perd son rôle de vecteur dominant et indispensable, d'autant plus que le poids de la structure répresente une force quasi négligeable par rapport à sa cohésion, et de toute façon les forces au lieu de se cumuler en descente de charge, se répartissent et se compensent dans toutes les directions.

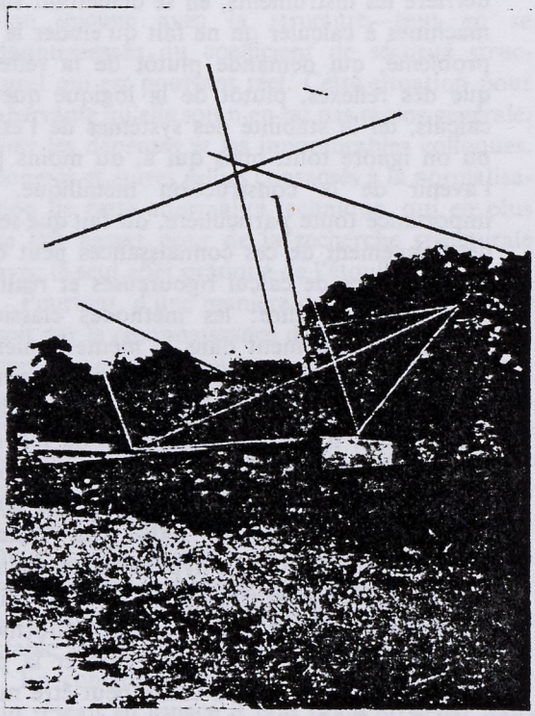


Figure 25. Monument à la Forme Futile près de Rambouillet.

Les précedents concepts énoncent les éléments d'une theorie de stabilité spatiale et quelque peu dynamique, en établissant le principe qu'un ensemble de corps est en situation stable si les forces le sollicitant produisent des déséquilibres controlés et on le verra par la suite de securité controlable.

Controle de stabilite

Degré de sécurité

Actuellement, la plus grande confusion règne dans le domaine de la stabilité des ensembles du fait de l'insuffisance des hypothèses fondamentales, notamment par l'arbitraire dans l'évaluation du degré de sécurité des systèmes. Cependant il est curieux que pour suppléer à ces carences on pousse la recherche dans les domaines qui n'ont rien à faire avec la composition structurale et de plus qui sont largement connus—du moins dans la mesure ou on peut les connaître. A grand renfort de cerveaux

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

électroniques, on introduit ainsi le probabilisme dans l'évaluation des extra-surcharges; ou la statistique dans l'éventualité des défauts de résistance des pièces; ou la prévision des accidents dus à l'imprévoyance . . . bref on crée une sorte de science de la bêtise. Mais en se cachant derrière les instruments, en se démettant sur les machines à calculer on ne fait qu'éluder le vrai problème, qui demande plutôt de la réflexion que des réflexes, plutôt de la logique que des calculs, tel la stabilité des systèmes de l'espace ou on ignore tout, mais qui a, du moins pour l'avenir de la construction métallique, une importance toute particulière, du fait que seul le développement de ces connaissances peut créer des méthodes de calcul rigoureuses et réalistes. Car il faut le dire: les méthodes classiques mettant pratiquement dans le même panier les structures instables, isostatiques et hyperstatiques sont purement et simplement fantaisistes.

De même, il y a peu de chance de résoudre ces problèmes en cherchant une conception homogène de la sécurité indifféremment que le système considéré soit stable ou instable, d'autant moins que l'hyperstaticité—comme d'ailleurs l'hypostaticité—peut être de divers degré; donc ce n'est pas à un taux uniforme de 15 à 20 pour cent qu'on peut chiffrer la plus-value constructive qui en verité peut être même multiple. Évidement on n'élucidera pas ces phénomènes en supposant qu'on augmente la sécurité d'une structure en étudiant le hasard au lieu de la structure même.

Les inconvenients qui résultent de ce jeu de loterie autour des 'coefficients d'ignorance' ne grèvent en fait que les métaux, matière chère et dont il faut être économe, mais à l'intérieur de la construction métallique tout particulièrement le développement des structures spatiales lesquelles pourtant concues convenablement ont en fait une stabilité controlable.

Donc ainsi après avoir touché les questions morphologiques de l'espace et ensuite l'indéformabilité des réseaux, il y a lieu maintenant de tirer quelques conclusions d'ordre général pour l'étude et les calculs de la probité des structures et non seulement de leur probabilité.

Hyperstaticité

En matière de staticité, jusqu'à maintenant on distinguait seulement deux degrés: strictement statique et hyperstatique. Une structure était considérée strictement statique si la suppression d'une seule membrure ou la dissociation d'un seul joint provoquait sa dislocation. Elle était considérée comme hyperstatique dans le cas contraire. Mais il n'existait aucune methode d'appréciation, ni aucun critère d'évaluation du degré de l'hyperstaticité même. En effect, la simple comptabilité de nombre de barres surabondantes qu'on pouvait enlever jusqu'à provoquer l'écroulement sans se préoccuper du rapport numerique entre les éléments supprimés et conservés, ou de leurs positions relatives dans un système complexe, ou de l'homogèneité de composition de celui-ci, ne pouvait guère donner une indication utile et valable de l'éventuelle surstabilité ni des avantages donc des allégements qui pouvaient en résulter. Bien au contraire la pratique exigeait de ne pas compter du tout avec les barres surabondantes, ou tout au plus qu'en tant que remplacant éventuel en cas de faillure d'un élément isolé—ce qui est une éventualité plus qu'hypothétique dans on réseau répétitif.

Pourtant il relève du simple bon sens qu'une structure indéformable possédant des éléments surabondants est plus sûre qu'une autre strictement statique, de même qu'une structure ayant un plus haut degré hyperstatique est plus sûre qu'une autre d'un degré moindre et enfin que ce surcroit de securité doit être exploitable.

Quand il s'agit d'un ensemble construit sans régularité aucune l'investigation pour évaluer la stabilité est difficile et tout en réconnaissant que les structures irrégulières sont en principe les plus stables—du fait que l'irrégularité, par l'absence même d'élément de symétrie, provoque un relativement grand nombre de conflits cinétiques qui bloquent les déplacements—on préférera des systèmes répétitifs qui ont l'avantage de la standardisation des éléments et en même temps une représentabilité plus aisée.

Ces configurations répetitives présentent donc une plus ou moins grande regularité, laquelle dépend du degré de complexité qui est inversement proportionnel au degré de symétrie de la composition. Et comme la variation du degré de symétrie depend de la complexité, celle-ci influence le comportement statique de l'ensemble: la présence ou l'absence d'éléments de symétrie augmente ou diminue la possibilité de déplacements relatifs des éléments.

Partant de là il est possible d'établir une méthode pour procéder à l'examen de stabilité d'une structure hyperstatique.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

Méthode d'analyse

La méthode à suivre sera la suivante: déterminer d'abord l'identité morphologique exacte de la structure, et non seulement ses mensurations mais la nature de son espace de support, son homogèneité et complexité; si elle est complexe les simplexes successifs selon leur ordre heirarchique; ensuite dresser sa représentation graphique et énumérative, c'est à dire ses graphes et matrices.

Minimaliser la structure sur maquette, ce qui consiste à élaguer systèmatiquement de plus en plus d'eléments homothétiques—de position et rôle identiques—en començant par des constituants inférieurs dans la hiérarchie et an allant vers la suppression des sous-ensembles entiers dans les cas complexes, ceci jusqu'à obtenir une configuration derivée strictement indéformable. A remarquer qu'il peut exister de nombreuses alternatives dans le cheminement de cette analyse minimalisante. A chaque étape la proportion entre éléments indispensables et surabondants peut être évaluée comme autant de facteurs subordonnés d'hyperstaticité ou bien leur ensemble escompté comme un coefficient de réduction global.

Pour procéder ensuite au calcul de répartition des efforts il existe deux chemins d'approche suivant qu'on table sur le chemin integral ou bien sur le minimalisé. Dans le premier cas on distribue les efforts directements dans tous les éléments même les surabondants pourvu qu'ils soient effectivement participants ce qui devait se révéler au cours de la première partie de l'analyse. Dans le deuxieme cas, on calcule d'abord les efforts dans la structure diminuée donc strictement indéformable et on applique les coefficients de réduction admissibles, en raison de la contribution des éléments surabondants dans la structure finale.

En effect, connaissant après l'analyse indiquée le rapport exact non seulement numerique mais aussi hiérarchique de ces éléments on ne peut plus négliger la contribution des surabondants dans la répartition des efforts—la matière étant d'ailleurs suffisamment plastique pour que cette répartition soit effective dans la pratique. Mais, même si on n'admettait pas ces faits par précaution exagérée il reste tout de même la présence de ces éléments en tant que substituts d'éléments défaillants, donc en tant que générateurs d'un coefficient de sécurité structurale controlable; ce qui rend alors surabondants certains autres coefficients de sécurité—ou d'ignorance—qu'on était obligé d'accepter au niveau de la résistance des matériaux. Car en effet on a établi, normalisé, fignolé un coefficient de securité 'universel' en fait introuvable sans relation aucune avec la structure—tout en se désinteressant du coefficient de sécurité structural qui est pourtant réel. Cette situation pour aberrante qu'elle soit n'en est pas moins générale, voir les dépenses et les innombrables colloques, congrès et autres rallies consacrés à la normalisation de cette anormalité technique, qui en plus se fait passer pour de la recherche structurale avec le seul effet pratique de l'étouffer.

Pourtant, d'une manière ou d'une autre, donc soit par la reconnaissance de la participation des constituants surabondants dans les efforts proportionellement à leur nombre et situation, soit par la suppression de divers coefficients de sécurité en échange du secours éventuel de ces mêmes constituants—l'analyse des formes, de l'indéformabilité et du degré d'hyperstaticité tel qu'il a été ébauché ici doit conduire à un résultat plus conforme à la réalité, traduisant les avantages indéniables des formes de géometrie stable par rapport aux compositions routinières.

En conclusion, pour construire correctement un réseau en espace il faut donc procéder dans l'ordre suivant:

> Étudier dans chaque cas la stéréotomie des diverses compositions possibles; choisir parmi ces formes des statiques ou hyperstatiques, ayant l'avantage d'être assemblées d'une manière articulée, ce qui implique que dans la pratique il faut chercher à développer des joints articulables; déterminer le degré de stabilité du système choisi en étudiant sa complexité topologique; évaluer le coefficient de sécurité structural qui peut être non seulement un simple pourcentage mais un véritable multiplicateur et en tenir compte dans le calcul de répartitions des efforts et enfin dans le dimensionnement des pièces.

Tout laisse à penser que basé sur des termes géometriques et constructifs cette approche, qui est en même temps un programme est le moyen de révéler d'une manière exacte et chiffrée la superiorité décisive des structures spatiales par rapport aux masses monolithiques.

© Blackwell Scientific Publications Ltd 1966
Printed by Adlard & Son Ltd, Dorking

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

Reg. du Commerce 58 B 10 117 Seine
Numero d'entreprise 802-75-115-0034
Adresse telegraphique LABOBATRA
Compte Cheques Postaux 9887-74 Paris

CENTRE EXPERIMENTAL DE RECHERCHES ET D'ETUDES DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

Siège Social
12, rue Brancion,
Paris 15e
Téléphone :
Vaugirard 95-49
Lecourbe 21-69

Societe d'Ingénieurs
à Responsabilité Limitée et Objet Civil
au Capital de soixante mille francs

Seul organisme agreé pour l'application
des regles et procédes des
LABORATOIRES DU BATIMENT ET
DES TRAVAUX PUBLICS

V/Référence

N/Référence JG/TB
Dossier N° 564

Paris le 28 Juin 1966

108

ESSAI

D'UNE MAQUETTE

TRIDIMENSIONNELLE

Paris Bordeaux Dijon Lyon Marseille Nancy Orléans Rennes Rouen Toulouse Abidjan
Alger Brazzaville Casablanca Dakar Douala Yaoundé Libreville Pointe-Noire Tananarive

A la demande du CENTRE TECHNIQUE INDUSTRIEL DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE, LE CENTRE EXPERIMENTAL DE RECHERCHES ET D'ETUDES DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS a procédé à la réalisation et aux essais d'une maquette d'ensemble tridimensionnel.

REALISATION DE LA MAQUETTE -

Les dimensions des éléments, barres, tirants, utilisés pour la réalisation de la maquette, sont les suivantes :

- barres : tube en acier sans soudure de 48,6mm de diamètre extérieur et 2,6mm d'épaisseur. Longueur théorique entre noeud I 394,5mm.
- ceintures de base : acier étiré de 8mm de diamètre. Longueur théorique entre noeud 1 143,1mm.
- ceintures hexagonales : acier étiré de 8,5mm de diamètre. Longueur théorique entre noeud 660mm.
- tirants obliques : acier étiré de 9,5mm de diamètre. Longueur théorique entre noeud 660mm.

Les liaisons des différentes bases aux noeuds ont été réalisées de façon à reproduire le mieux possible un système réticulé.

Des embouts comportant une cavité demi-sphérique sont fixés à l'extrémité des barres de sorte que la distance entre les centres des sphères corresponde à la longueur théorique. Ces embouts comportent des fentes pour le passage de chaque tirant avec un certain jeu permettant les déplacements angulaires de ceux-ci. Ces tirants, obliques, de base et des ceintures hexagonales, sont munis à leur extrémité de rondelles venant s'appuyer sur la surface sphérique interne des embouts. Les rondelles sont bloquées aux extrémités des tirants par des boutons formés par repoussage.

La photo n° I montre le détail d'un noeud sur la maquette montée.

.../...

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

DISPOSITIFS D'ESSAI ET DE MESURE -

Le chargement est effectué à l'aide d'une presse d'essai possédant une sensibilité de 3 tonnes. A sa base la maquette repose sur le sol en trois points de la ceinture de base par l'intermédiaire d'embout sphérique monté aux extrémités des tubes. A sa partie supérieure, un cadre triangulaire repose sur les trois embouts sphériques de la ceinture de base supérieure. Les efforts sont appliqués par le vérin au centre de gravité du triangle. Ceux-ci sont transmis sur les noeuds supérieurs et inférieurs de la maquette.

Des jauges de contraintes ont été collées sur six tirants de la ceinture hexagonale, trois tirants de la ceinture de base, trois tirants obliques et trois barres, pour suivre l'évolution des contraintes au cours du chargement.

Le raccourcissement total de la maquette est mesuré au cours du chargement avec une précision de l'ordre du demi-millimètre.

RESULTATS

PREMIERE MAQUETTE.- Une première maquette montée avec cinq niveaux n'a pu être essayée correctement par suite de la rupture prématurée d'un boutonnage en début de chargement.

DEUXIEME MAQUETTE.- La deuxième maquette essayée a été montée à trois niveaux et les essais ont été conduits de la façon suivante.

Les zéros des jauges ont été lus pour une contrainte nulle dans les barres et tirants correspondants.

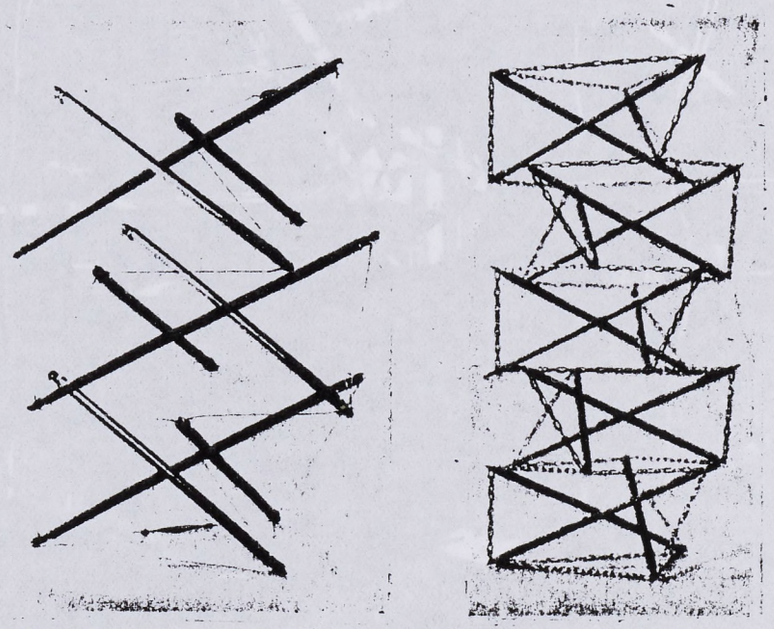
La maquette a été mise en précontrainte à l'aide des dispositifs à vis, insérés dans une barre de chaque étage, permettant de faire varier la longueur entre noeuds de la barre correspondante. La précontrainte maximale a été obtenue pour les barres réglées à leur longueur théorique entre noeuds moins deux millimètres.

.../...

Le chargement a été ensuite effectué par palier de 50 kg.

Les photos n° 2 et 3 montrent les maquettes à cinq niveaux en cours de montage et en place sous la machine. Le schéma page 5 donne la position des jauges.

Les résultats sont résumés par le tableau ci-dessous.

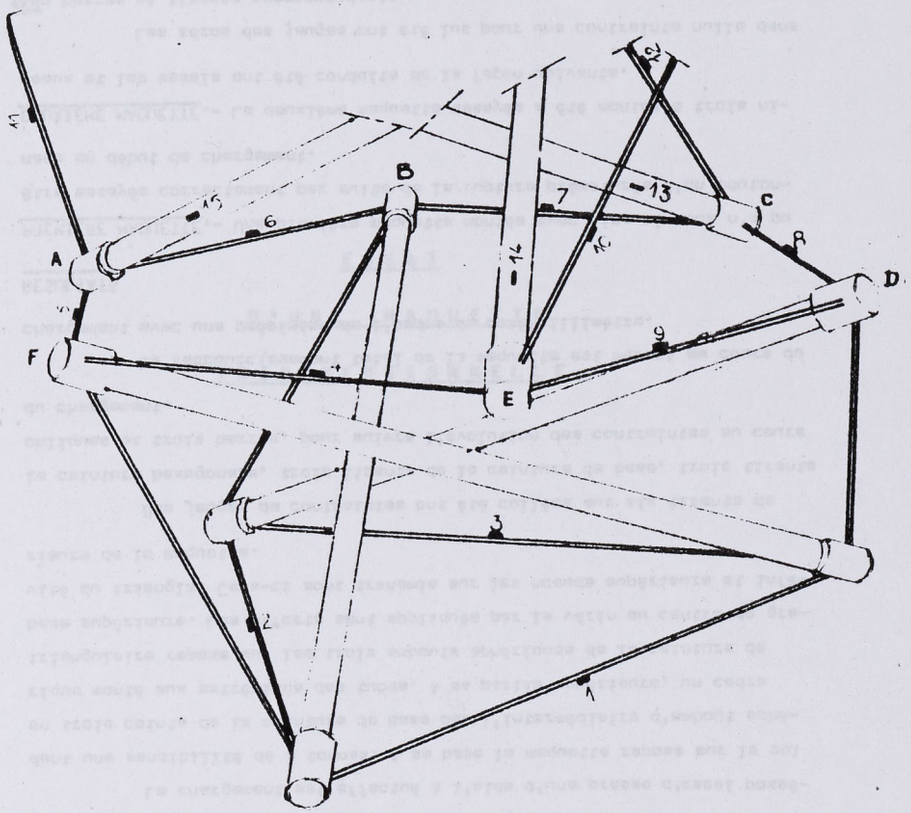


Mât autotendant constitué des sous-ensembles à trois barres, qui peut être employé indifféremment comme poutre, point-d'appui, pont...

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

511. 564

Disposition des Jauges



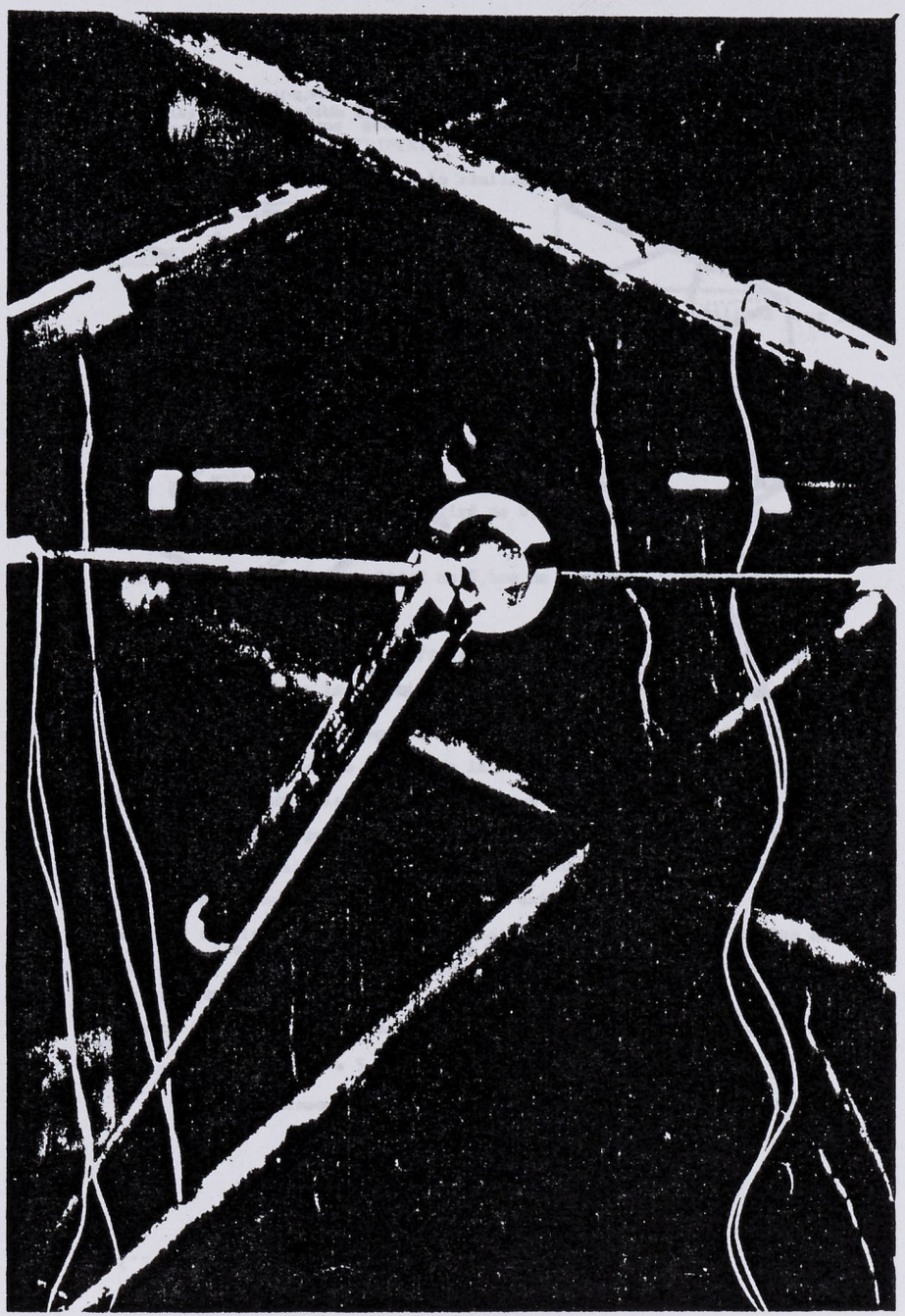


Photo n° I

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

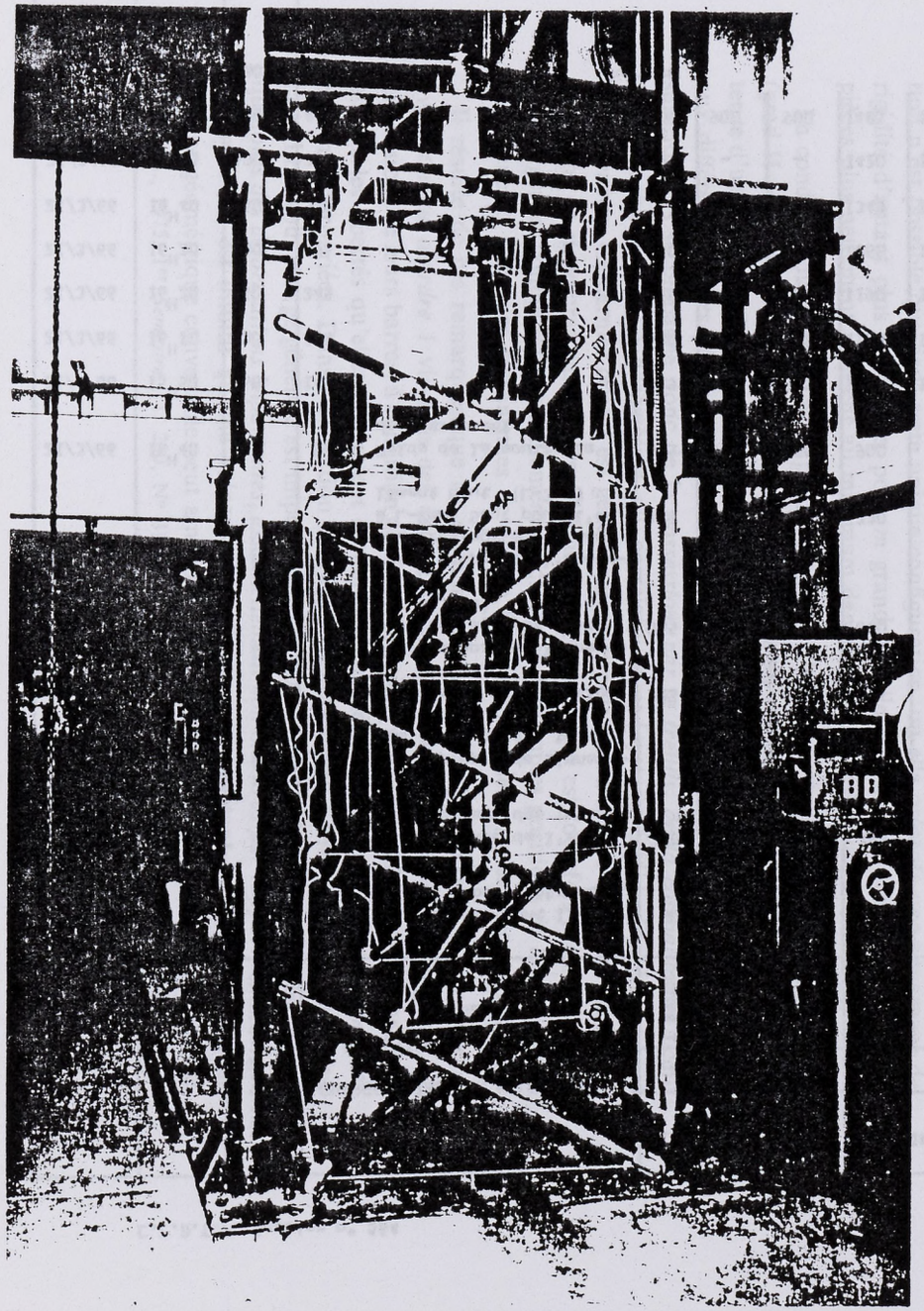


Photo n° 2

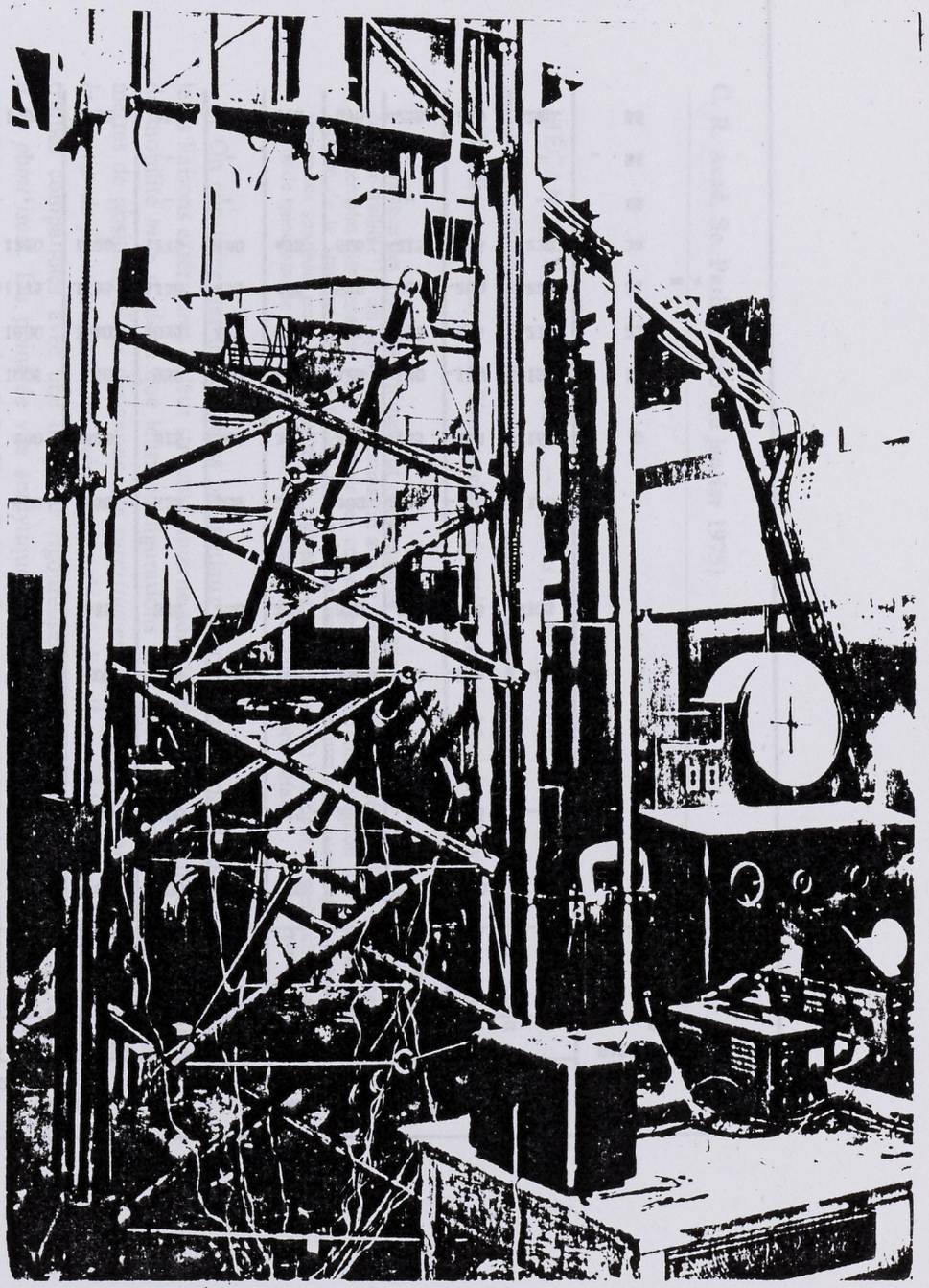


Photo n° 3

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

C.E.B.T.P. Dossier n° 564

DATE	HEURE	CHARGE APPLIQUEE PAR LE VERIN	CHARGE TOTALE EN KILOGRAMMES AU CENTRE DE GRAVITE DU TRIANGLE		CEINTURE DE BASE TRIANGLE $A^{I}/_{1}\,10^{-6}$			CEINTURE DE NIVEAU HEXAGONE $A^{I}/_{1}\,10^{-6}$						TIRANTS OBLIQUES $A^{I}/_{1}\,10^{-6}$			TUBES $A^{I}/_{1}\,10^{-6}$			RACCOURCISSEMENT en mm
					Jauge 1	Jauge 2	Jauge 3	Jauge 4	Jauge 5	Jauge 6	Jauge 7	Jauge 8	Jauge 9	Jauge 10	Jauge 11	Jauge 12	Jauge 13	Jauge 14	Jauge 15	
21/3/66	11H30	0	0	Les Tirants sont libres et les tubes légèrement comprimés.	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
21/3/66	12H	0	0	Poids propre de l'ensemble (réglage des tubes à L-5mm).	260	190	200	495	425	340	465	350	400	150	145	265	-85	-75	-80	
21/3/66	15H	0	0	Poids propre de l'ensemble (réglage des tubes à L -5mm). Lecture de vérification.	235	160	180	495	430	270	390	300	315	140	145	250	-50	-50	-60	
21/3/66	15H10	0	0	Poids propre de l'ensemble (réglage des tubes à L -3,5mm).	355	300	300	630	610	500	580	515	515	250	235	330	-100	-95	-105	
21/3/66	15H20	0	0	Poids propre de l'ensemble (réglage des tubes à L-2mm) Sauf pour l'élément haut (L-3mm)	445	375	370	730	720	620	690	635	630	305	285	380	-140	-130	-140	
21/3/66	15H40	0	95	Poids de la poutrelle de chargement.	545	505	490	900	910	810	880	820	815	360	360	460	-155	-155	-160	0
21/3/66	15H50	50	145		615	590	575	1025	1040	935	1005	960	955	400	405	520	-180	-180	-190	11,3
21/3/66	16H10	100	195		660	640	625	1105	1125	1020	1080	1040	1035	425	425	535	-195	-195	-210	23
21/3/66	16H20	150	245		710	695	685	1190	1220	1115	1175	1135	1130	455	465	580	-200	-200	-220	31
21/3/66	16H30	200	295		760	750	745	1260	1295	1200	1260	1220	1215	480	495	605	-215	-215	-230	38
21/3/66	16H40	250	345		-	-	-	1345	1385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45
21/3/66	16H45	300	395		-	-	-	1420	1460	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51
21/3/66	17H00	350	445		900	900	900	1485	1530	1440	1490	1460	1450	535	570	675	-255	-260	-280	56
21/3/66	17H10	430	525	Rupture																

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

MÉCANIQUE THÉORIQUE. — *Efforts et déformations dans les assemblages en treillis critiques et surcritiques en élasticité linéaire.* Note (*) de MM. **Jean Tardiveau** et **Raymond Siestrunck**, présentée par M. Maurice Roy.

L'existence des systèmes critiques fut remarquée au siècle dernier dès les débuts de la construction en treillis (1) : on apprit à les connaître afin de les éviter, et les traités en citent usuellement des exemples élémentaires pour montrer les conséquences d'une contravention à l'hypothèse de rigidité de la statique. Des tentatives récentes d'utiliser des configurations surcritiques dans des structures spatiales pour leurs qualités de légèreté ou d'esthétique (2) justifient la recherche d'une méthode générale de calcul qui, à notre connaissance, fait encore défaut.

a. On considère des treillis plans ou spatiaux à articulations parfaites, non dégénérés; leurs liaisons extérieures et leur structure interne sont telles que ces systèmes ont un indice de mobilité $m > 0$, donc que leurs configurations sont présumées dépendre de m paramètres de position. Nous désignons par *surcritiques* ceux dont, par fortuité géométrique, *le champ de fonctionnement en mécanisme*, c'est-à-dire l'ensemble des positions géométriques compatibles avec une longueur rigoureusement constante des barres, *se réduit à un point isolé.* Du point de vue analytique, l'équation du fonctionnement qui définit, par exemple sous forme implicite $H = 0$, les valeurs d'une variable de sortie en fonction des m entrées reconnues du mécanisme, présente en ce point une forme différentielle linéaire nulle et une forme quadratique définie : il n'y a pas de chemin réel d'évolution du système à partir de la position considérée. Du point de vue physique, l'assemblage de la construction n'est possible que dans cette unique configuration, où elle présente une apparence de rigidité d'autant plus séduisante, pour m grand, qu'elle est obtenue avec un nombre de pièces plus nettement inférieur au minimum demandé à un treillis rigide classique.

La condition du premier ordre pour l'existence d'un point singulier du fonctionnement (grad $H = 0$) est aussi celle d'abaissement du rang du système linéaire qui exprime l'existence d'un ensemble de torseurs cinématiques non nuls pour les mouvements relatifs permis aux différentes pièces par leurs liaisons dans l'assemblage [système C (3)] : le caractère surcritique s'accompagne donc de la *possession, par le treillis, de la compatibilité locale d'un mécanisme à $m+1$ paramètres*, ou, corrélativement [système S (3)], *d'un état propre de contrainte.* Ce dernier critère est généralement le plus aisé à mettre en œuvre dans une recherche de structures particulières; l'étude au second ordre est toutefois nécessaire pour départager les configurations réellement surcritiques des simples positions de *branchement*, communes à plusieurs mécanismes de course finie utilisant les mêmes pièces du treillis.

Il résulte de ces remarques que les systèmes étudiés ont quel que soit *m le caractère hyperstatique d'ordre* 1 vis-à-vis des chargements extérieurs et des éventuels réglages de dimensions de leurs barres, à condition que ces opérations soient cinématiquement inactives ou que les libertés qu'elles pourraient exciter dans le mécanisme soient interdites par des liaisons appropriées. Dans l'utilisation courante, c'est-à-dire en l'absence de ces blocages, l'équilibre sous charge générale est impossible dans la position d'assemblage et n'est atteint qu'après *des déformations importantes, essentiellement non linéaires par rapport aux charges appliquées;* il est intuitif qu'une précontrainte obtenue en suscitant l'état propre par un réglage géométrique convenable peut améliorer ce comportement en raidissant le système.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Les dispositifs communément appelés *critiques* entrent dans la définition précédente pour $m = 0$: systèmes présumés isostatiques, en fait mécanismes à un paramètre, à plage de fonctionnement nulle; leur intérêt en construction est, *a priori*, improbable, mais leur simplicité permet une mise au point aisée des méthodes de calcul.

b. Les b barres du treillis relient entre eux certains des n nœuds d'articulation A_i dont les cotes d'assemblage sont données; les longueurs de construction des pièces sont $A_i A_j = l_{ij}$. Les efforts exercés par une barre sur ses liaisons d'extrémités, repérés respectivement en A_i sur l'unitaire $\mathbf{u}_{ij}$ de $A_i A_j$ et en A_j sur $\mathbf{u}_{ji} = -\mathbf{u}_{ij}$, ont dans tout état d'équilibre du système même intensité $F_{ij} = F_{ji}$. Si, pour la simplicité des décomptes, nous bornons l'analyse aux ensembles dont l'autorigidité approchée justifie la tenue par les liaisons extérieures d'un solide isostatique, l'indice de mobilité est $m = 3n - b - 6$, et le caractère surcritique général implique l'existence simultanée :

- d'une solution f_{ij}, une fois indéterminée (état propre de contrainte), au système homogène $3n \times b$,

$$\sum_j f_{ij}\,\mathbf{u}_{ij} = 0 \qquad (i = 1, \ldots, n;\ A_j \text{ relié à } A_i), \tag{1}$$

exprimant l'auto-équilibre des nœuds, et dont le rang est exactement $b - 1$;

- d'une solution $\delta\mathbf{A}$, indéterminée d'ordre $m+1$, au système homogène $b \times 3n$:

$$\mathbf{u}_{ij}.(\delta\mathbf{A}_j - \delta\mathbf{A}_i) = 0 \qquad (A_j \text{ relié a } A_i), \tag{2}$$

traduisant, par équiprojectivité sur chaque barre, la compatibilité cinématique des déplacements d'extrémités (dont six composantes sont fixées par les liaisons), et dont le rang est également $b - 1$. Dans le cas particulier d'une structure plane, les f_{ij} résultent généralement de manière immédiate d'un tracé d'autocrémona, tandis que les $\delta\mathbf{A}$ peuvent être composés à partir de $m+1$ diagrammes unitaires des déplacements rabattus donnant l'influence des variables prises pour base.

c. Pour l'étude des déformations, nous attachons aux extrémités de chaque barre dans sa position d'assemblage des trièdres **u**, **v**, **w** orthornomés opposés, dont les axes **u** sont ceux précédemment définis, les **v**, **w** étant choisis au mieux; les composantes sur ces axes des déplacements relatifs d'extrémités

$$u_{ij} = \mathbf{u}_{ij}.(\delta\mathbf{A}_j - \delta\mathbf{A}_i), \quad v_{ij}, \quad w_{ij},$$

ont, dans la permutation des indices, la parité, donc le caractère intrinsèque, des variables de forces ($u_{ij} = u_{ji}$, etc.). Pour un ensemble de déplacements arbitraires des nœuds, u, v, w sont généralement non nuls pour chaque barre, mais il résulte immédiatement du principe des travaux virtuels appliqué au système d'autocontrainte que les déplacements relatifs longitudinaux sont toujours *orthogonaux* aux efforts propres sur l'ensemble des barres du treillis :

$$\sum_b u_{ij} f_{ij} = 0; \tag{3}$$

en particulier, le jeu, solidifiant, du mécanisme, défini par $u_{ij} = 0$, satisfait évidemment à cette relation, tandis que v_{ij}, w_{ij} obtenus de la solution $\delta\mathbf{A}$ de (2) sont des formes linéaires homogènes à $m+1$ paramètres.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Parmi les déplacements *réels* des nœuds, il convient de distinguer entre les états de contrainte propre ou de chargements cinématiquement inactifs (les composantes u, v, w y sont, comme pour une structure normale, de même ordre entre eux et proportionnels à leurs causes), et ceux des chargements actifs : l'expression des variations de longueur δl_{ij} des barres par rapport aux déplacements d'extrémités montre que les termes longitudinaux u sont alors de l'ordre du carré des transversaux. Au quatrième ordre en v, w, et sans répéter les indices, on a pour chaque barre :

$$\delta l = u + \frac{v^2+w^2}{2}, \qquad a\,\mathbf{F} = (\delta l + \delta l^0)\left[\mathbf{u} + \frac{v\,\mathbf{v} + w\,\mathbf{w}}{l}\right], \tag{4}$$

a_{ij} étant la déformabilité longitudinale de $A_i A_j$ en élasticité linéaire et δl^0_{ij} la déformation due à une éventuelle précontrainte.

d. On obtient une description aisée des déformations modérées et de la partie principale des efforts dans les pièces des treillis surcritiques sous l'action d'un chargement actif quelconque $\mathbf{P}_i$ (A_i) dans les deux hypothèses suivantes :

α. Les intensités F_{ij} sont proportionnelles aux efforts propres correspondants f_{ij}; si k est l'intensité d'un éventuel état propre de précontrainte, on a alors par (3) et (4) :

$$\frac{F_{ij}}{f_{ij}} = K = k + \frac{B}{2A} \quad \text{si} \quad A = \sum_b a_{ij} f_{ij}^2, \quad B = \sum_b (v_{ij}^2 + w_{ij}^2)\frac{f_{ij}}{l_{ij}}. \tag{5}$$

β. Les paramètres cinématiques reconnus en (2), soit λ, μ, ..., sont pertinents pour la formation du potentiel thermodynamique ψ en variables de déplacements ([4]) à partir de la forme quadratique B :

$$\frac{\partial \psi}{\partial \lambda} = \frac{K}{2}\frac{\partial B}{\partial \lambda} = \sum_i \mathbf{P}_i \frac{\partial\, \delta \mathbf{A}_i}{\partial \lambda} = P_\lambda, \ldots, \tag{6}$$

les composantes généralisées P_λ du chargement sur les différents modes du mécanisme, combinaisons linéaires des P_i, étant les variables actives de la déformation. On obtient de (6) le système linéaire homogène $m \times (m+1)$

$$\frac{1}{P_\lambda}\frac{\partial B}{\partial \lambda} = \frac{1}{P_\mu}\frac{\partial B}{\partial \mu} = \ldots,$$

qui détermine les variables cinématiques en proportion d'une d'entre elles, λ par exemple; l'équation (6), réduite par substitution à une équation algébrique en λ, montre alors les propriétés fondamentales des systèmes surcritiques : *en l'absence de précontrainte, les paramètres de déplacement* (rapportés à une longueur l caractéristique de la structure), *varient comme la racine cubique, la partie principale des efforts internes adimensionnels* $F_{ij}\,A/l$ *comme la puissance* 2/3, *du groupement* $p = PA/l$, ou P est l'intensité des chargements proportionnels P_i. *Une précontrainte rend finie la déformabilité des treillis à charge nulle et leur confère un domaine de déformations quasi-linéaires d'autant plus étendu sous charges croissantes que la précontrainte est plus élevée.*

e. L'hypothèse (α), relevant du comportement asymptotique des efforts à déformation nulle, ne permet pas, en général, de satisfaire à la condition d'équilibre des nœuds du système déformé. Il est donc nécessaire de poursuivre le développement $F_{ij}(p)$ au-delà de

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

la partie principale en $p^{2/3}$ et on voit aisément que les termes suivants, linéaires en p, correspondent à la solution, classique, d'équilibre du treillis non déformé sous l'action du chargement *inactif*

$$\mathbf{Q}_i = \mathbf{P}_i + \sum_j \mathrm{K} f_{ij} \frac{v_{ij}\,\mathbf{v}_{ij} + w_{ij}\,\mathbf{w}_{ij}}{l_{ij}} \qquad (\mathrm{A}_j \text{ relié a } \mathrm{A}_i),$$

évalué à partir des éléments déjà connus; à cette approximation, le calcul initial des déformations reste inchangé. Les termes suivants, en $p^{4/3}$, peuvent être négligés aux charges modérées, principalement lorsque la précontrainte est élevée.

(*) Séance du 13 novembre 1974.

(1) M. Lévy, *La statique graphique et ses applications aux constructions*, Gauthier-Villars, Paris, 1888; partie 4, p. 308 *sequ.*

(2) D. G. Emmerich, *Architecture d'aujourd'hui*, 116, 1964; *Technique et Architecture*, 26, 1966, p. 10-12.

(3) R. Siestrunck, *Rev. Fr. de Mécan.*, 45, 1973, p. 5-12.

(4) M. Roy, *Mécanique*, II, Dunod, Paris, 1966.

École Normale supérieure,
de l'Enseignement technique,
61, *avenue du Président-Wilson,*
94230 *Cachan;*
Université de Paris VI,
Laboratoire de Mécanique physique,
2, *place de la Gare-de-Ceinture,*
78210 *Saint-Cyr-L'École.*

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

ETUDE DES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES PARTICULIERES AUX STRUCTURES AUTOTENDANTES

A. CHOMARAT, Ingénieur E.N.S.M., Docteur ès-Sciences, Professeur à l'U.P.A. Nantes.

A. CHASSAGNOUX, Ingénieur E.N.S.A.I.S., Architecte D.P.L.G., Professeur à l'U.P.A. Nantes.

J. SAVEL, Mathématicien, Informaticien, Professeur à l'U.P.A. Nantes.

Résumé.— Les structures autotendantes tiennent une place à part dans la classification des structures. Les travaux effectués par D.G. EMMERICH sur leur morphologie montrent la grande diversité de leurs configurations géométriques.
Dans la présente étude, les auteurs établissent les relations mathématiques déterminant l'organisation spatiale des composants des structures autotendantes, et démontrent que ces structures présentent la particularité d'être à l'origine des mécanismes qui se transforment en structures stables dès qu'ils sont soumis à l'action d'une charge.

Abstract.— The "tensigrity" structures have a special place in the structures classification. Some developments by D.G. Emmerich on their morphology show their important diversity in their geometrical configurations.
In that study, the authors describe the mathematical relations settling the spatial organisation of the tensigrity structures componants and demonstrate that these structures present the particularity to be at the origine of mechanisms which transform themselves in stable structures as soon as they are loaded.

NOTATIONS

$0, x, y, z$:	Système d'axes orthonormés.
ϕ :	Angle des rayons passant par deux sommets consécutifs du polygone de base d'un simplex autotendant.
β :	Angle de rotation entre les deux polygones de base d'un simplex autotendant.
γ :	Angle de rotation séparant deux sommets d'une même membrure comprimée d'un simplex autotendant.
p, q, r, t :	Divers sommets des polygones de base d'un simplex autotendant.
x_p, y_p, z_p ; x_q, y_q, z_q x_r, y_r, z_r	Coordonnées des points p, q, r dans le repère 0, x, y, z.
l_{pq}, l_{pr} :	Longueurs des membrures comprimées et des câbles latéraux d'un simplex autotendant.
s :	Nombre des sommets des polygones de base d'un simplex autotendant.
h :	Hauteur séparant les deux polygones de base d'un simplex autotendant.
R :	Rayon du cercle circonscrit au polygone de base d'un simplex autotendant.
(C) :	Cercle d'intersection des sphères de centre p, rayon l_{pq} et de centre t, rayon l_{tq}.
θ, θ^* :	Angle de la tangente en q à l'hélicoïde trajectoire du point q, avec le plan horizontal contenant les points q et r.
ψ :	Angle de la tangente au cercle (C) en q avec le plan horizontal contenant les points q et r.

I — SPECIFICITE DES STRUCTURES AUTOTENDANTES

Les structures autotendantes sont des treillis spatiaux indéformables constituant des réseaux finis ou infinis suivant la disposition des noeuds : structures polyédriques, réseaux double-nappe, ou réseaux de type cristallin se développant dans les trois directions.

Les structures reliant les noeuds sont de deux sortes :

— un réseau continu de membrures tendues,

— un réseau discontinu de membrures comprimées.

La morphologie particulière des structures autotendantes entraîne un comportement mécanique spécifique de ces structures qui les différencie des treillis spatiaux usuels :

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

– Le sens des efforts dans les membrures (traction ou compression) est invariable quel que soit le cas de charge extérieur appliqué aux noeuds de la structure autotendante.

– Chaque noeud reçoit en principe une seule barre comprimée et plusieurs tirants (Fig. 1).

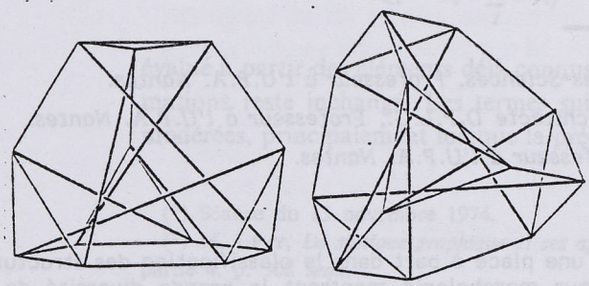


FIG. 1. Tétraèdre tronqué autotendant.

– Une structure autotendante devient rigide sous l'effet d'une précontrainte réalisée par la mise en tension interne des tirants, et la mise en compression interne des membrures comprimées, ceci sans solliciter les appuis de la structure.

– Les Constructions des structures autotendantes complexes, et en particulier celles à membrures stéréométriques (polyèdres, mâts, réseaux double-nappe, réseaux de type cristallin), s'effectuent à partir de structures autotendantes élémentaires appelées simplex, assemblées entre elles suivant des lois de formation particulières.

Ces lois de formation (juxtaposition, pénétration totale ou partielle des simplex) ne sont pas abordées dans la présente étude, elles ont été définies par D.G. EMMERICH *.

Les simplex ou équilibriums autotendants sont des structures autotendantes élémentaires dont l'organisation géométrique et la stabilité font l'objet de cette étude.

II – ETUDE THEORIQUE DE LA MORPHOLOGIE DES SIMPLEX AUTOTENDANTS

II-1 Définition des simplex autotendants

On appelle simplex ou équilibriums autotendants des structures autotendantes élémentaires telles que les noeuds correspondent aux sommets de deux polygones réguliers de même nombre de côtés situés sur deux plans parallèles.

Les arêtes de ces polygones à "s" côtés sont des câbles, les deux polygones sont reliés par "s" barres de compression et "s" câbles.

Les volumes convexes, enveloppe de ces simplex, sont des prismes et antiprismes dans le cas de deux polygones identiques, ou des pyramides et antipyramides si l'un des polygones est plus grand que l'autre.

Dans le cas de deux polygones identiques, on peut passer de l'un à l'autre par une translation et une rotation d'axe parallèle à la translation. Dans le cas où les deux polygones sont de taille différente, il faut ajouter à la translation et la rotation une dilatation (Fig. 2).

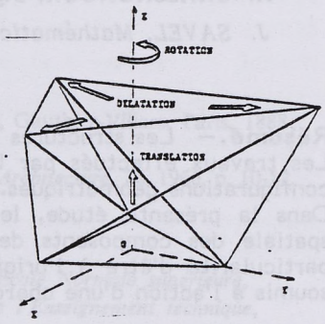


FIG. 2. Antipyramide à base triangulaire.

* A priori, il semble possible, en faisant varier les valeurs de la dilatation, de la translation et de la rotation, d'obtenir pour un même polygone une triple infinité de simplex.

Si cela est vrai pour la dilatation et la translation, il n'en est pas de même pour la rotation. Le but de l'étude est de montrer qu'en ce qui concerne ce paramètre, la morphologie d'un simplex quelconque est liée uniquement au choix des polygones qui le constituent.

* La rotation, précédemment définie, permettant de passer d'un polygone à l'autre, est indépendante de la translation et de la dilatation et ne peut prendre qu'un certain nombre de valeurs déterminées à partir des caractéristiques des polygones.

* L'étude géométrique des simplex permet, dans une seconde partie, de mettre en évidence les variations de la raideur des autotendants, et en particulier de montrer que ces ensembles sont initialement des mécanismes qui, sous l'action d'un chargement, se transforment en structures à raideur variable.

II-2 Détermination des valeurs de la rotation

* On désigne par 0, x, y, z le système d'axes orthonormés, tels que le point 0 situé au centre du cercle circonscrit au polygone de base, et l'axe z perpendiculaire au plan de base.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

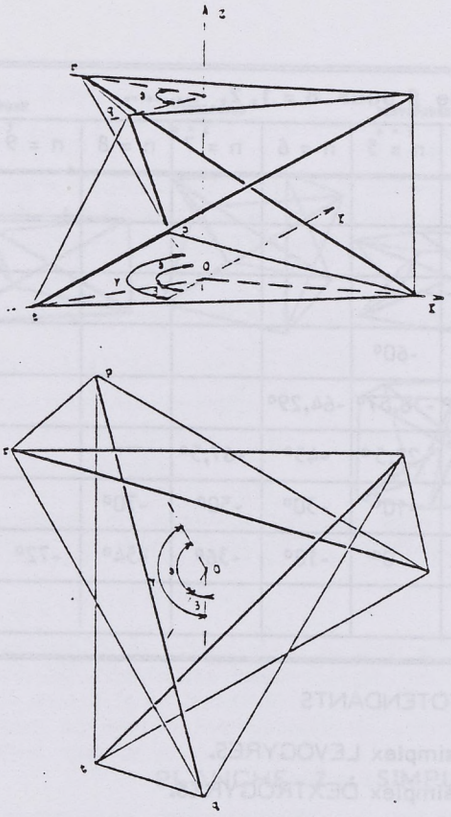


FIG. 3. Simplex à base triangulaire ou tripode.

Dans un but de simplification, les représentations graphiques, illustrant les démonstrations, correspondent au tripode autotendant, mais il convient de noter que les relations mathématiques sont générales et s'appliquent à l'ensemble des simplex.

On note :

- ϕ : angle au centre séparant deux sommets consécutifs du polygone de base.
- β : valeur de la rotation d'axe Oz faisant correspondre les deux polygones.
- p, q, r : le nom de quelques sommets des polygones.
- s : le nombre de sommets d'un polygone.

* Dans le cas général, une membrure rigide pq relie l'un des sommets p du polygone de base au sommet q du polygone supérieur tel que l'angle γ de la rotation d'axe Oz, permettant de passer de p à q, soit égal à :

$$\gamma = n\,\phi + \beta \qquad (1)$$

n est un entier inférieur au nombre de sommets des polygones.

La relation liant les coordonnées suivant les axes Ox, Oy des sommets d'une membrure rigide s'écrit ainsi :

$$\begin{pmatrix} x_q \\ y_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(n\phi+\beta) & -\sin(n\phi+\beta) \\ \sin(n\phi+\beta) & \cos(n\phi+\beta) \end{pmatrix} \qquad (2)$$

* Le câble tendu latéral passant par p aboutit au sommet r du polygone supérieur tel que l'angle de la rotation d'axe Oz permettant de passer de p à r soit égal à β

$$\begin{pmatrix} x_r \\ y_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \qquad (3)$$

* Les longueurs lpq et lpr des membrures rigides et des câbles, déterminées à partir des coordonnées des sommets, peuvent ainsi s'exprimer en fonction des valeurs correspondant au point p.

Tous calculs faits, il vient :

$$l_{pq} = [2\,(x_p^2 + y_p^2)\,(1 - \cos(n\phi+\beta)) + (z_q - z_p)^2]^{1/2} \qquad (4)$$

$$l_{pr} = [2\,(x_p^2 + y_p^2)\,(1 - \cos\beta) + (z_r - z_p)^2]^{1/2} \qquad (5)$$

Les polygones étant situés dans des plans parallèles :

$$z_r = z_q$$

ce qui donne, en développant les expressions (4) et (5) :

$$l_{pq}^2 = 4\,(x_p^2 + y_p^2)\,.\,\sin\left(\beta + \frac{n\phi}{2}\right) \sin\frac{n\phi}{2} + l_{pr}^2 \qquad (6)$$

* Les membrures comprimées exercent sur les noeuds, auxquels elles sont liées, des forces dirigées vers l'extérieur, imposant ainsi à ces points des déplacements, compatibles avec la géométrie de la structure, mais tels que la distance séparant ces noeuds soit **maximum**.

Pour une longueur de câble l_{pr} donnée, l'équation (6) montre que la longueur l_{pq} est maximum lorsque :

$$\beta + n\,\frac{\phi}{2} = \frac{\pi}{2} + 2\,k\pi \qquad (7)$$

* Si on suppose un dispositif mécanique (vérins par exemple) tel que les mâts soient extensibles, lors de la mise en précontrainte, les mâts se placeront dans la position correspondant à la position précédente.

* Pour un polygone donné, les différentes valeurs de n déterminent les formes : prismes ou antiprismes réguliers dans le cas des polygones pairs, antiprismes irréguliers dans le cas des polygones impairs, ou encore lévogyre-dextrogyre.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

Famille des simplex	s	ϕ	Valeurs de β pour n = 1, 2, ...									
			n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6	n = 7	n = 8	n = 9	.....
Tripodes	3	120°	30°	-30°								
Tétrapodes	4	90°	45°	0°	-45°							
Pentapodes	5	72°	54°	18°	-18°	-54°						
Hexapodes	6	60°	60°	30°	0°	-30°	-60°					
Heptapodes	7	51,43°	64,29°	38,57°	12,86°	-12,86°	-38,57°	-64,29°				
Octapodes	8	45°	67,5°	45°	22,5°	0°	-22,5°	-45°	-67,5°	—		
Ennéapodes	9	40°	70°	50°	30°	10°	-10°	-30°	-50°	-70°		
Décapodes	10	36°	72°	54°	36°	18°	0°	-18°	-36°	-54°	-72°	
.....												

TABLEAU 1 : SIMPLEX AUTOTENDANTS

Les valeurs de $\beta > 0$ correspondent aux simplex LEVOGYRES.

Les valeurs de $\beta < 0$ correspondent aux simplex DEXTROGYRES.

Les valeurs angulaires des simplex correspondant à $s \leqslant 10$ sont indiquées sur le tableau n° 1.

Les simplex correspondant à $s \leqslant 8$ (tripodes à octapodes sont représentés sur les planches 1 et 2.

Dans le cas des polygones où le nombre de côtés s est pair (tétrapodes, hexapodes, octapodes, décapodes,...) les configurations pour lesquelles $\beta = 0$ sont possibles en théorie, mais irréalisables dans la pratique, car les barres de compression sont concourantes en leur centre.

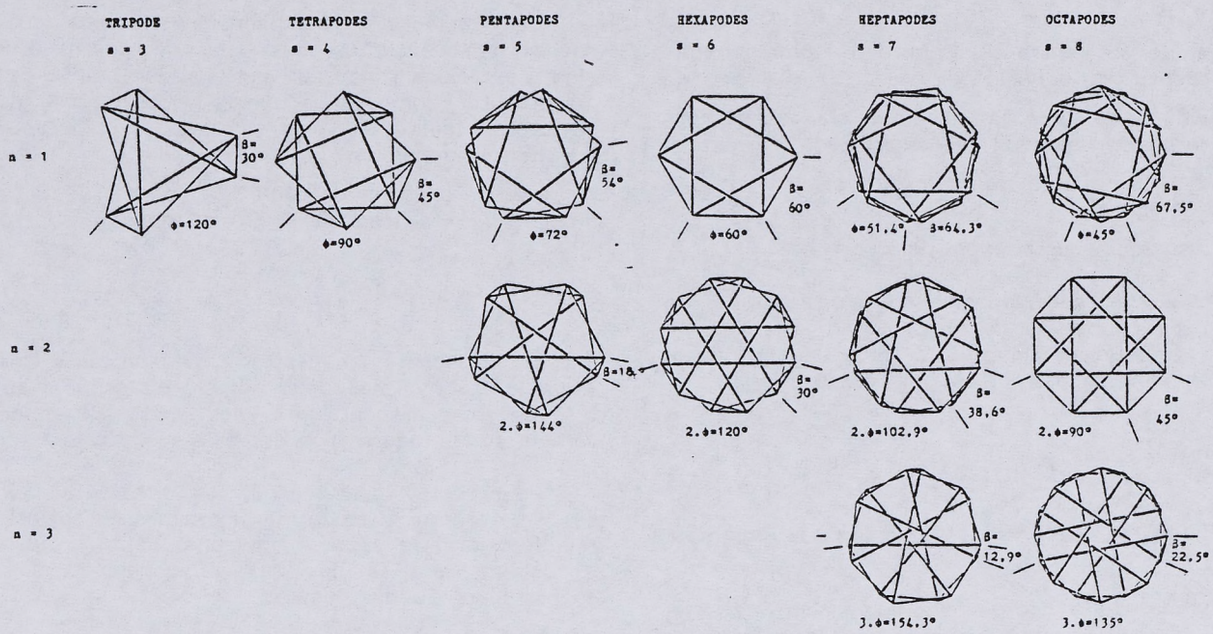


PLANCHE 1 : SIMPLEX AUTOTENDANTS LEVOGYRES.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

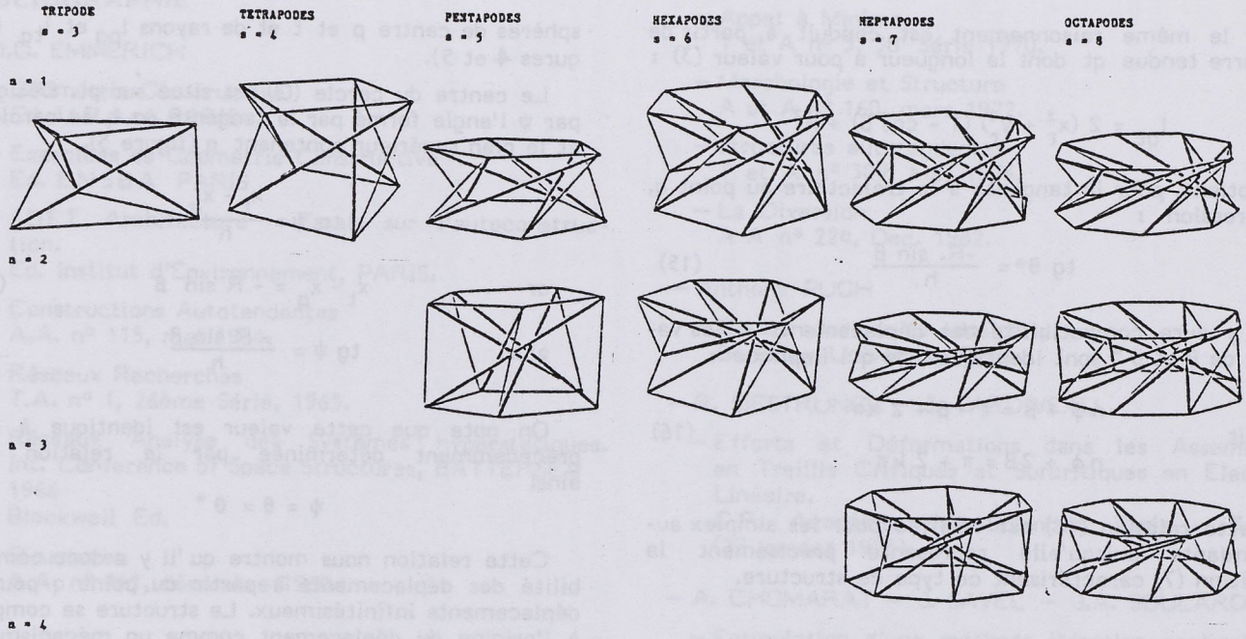


PLANCHE 2 : SIMPLEX AUTOTENDANTS LEVOGYRES.

II-3 Stabilité d'un simplex autotendant

II-3-1 Déplacement d'un sommet quelconque

Soit q un sommet du polygone supérieur lié par une membrure rigide au point p de la base, et par un câble au point t appartenant également à la base (Fig. 4).

La longueur de la membrure comprimée a pour valeur :

$$l_{pq}^2 = 2(x_p^2 + y_p^2)\,(1 - \cos(n\phi + \beta) + h^2) \qquad (8)$$

avec $h = z_q - z_p$.

Imposons au point q une rotation finie $d\beta$ autour de l'axe Oz, $d\beta$ restant cependant très petite par rapport à la rotation initiale β.

La rotation $d\beta$ entraîne un déplacement du point q dans la direction Oz que l'on désigne par dh.

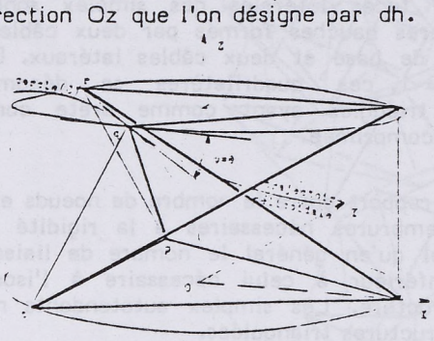


FIG. 4. Déplacements du sommet q.

Les variations de longueurs des membrures n'étant dues qu'aux déformations élastiques résultant des efforts, on peut considérer que ces longueurs restent inchangées au cours du déplacement imposé. Ainsi :

$$l_{pq}^2 = 2(x_p^2 + y_p^2)\,(1 - \cos(n\phi + \beta + d\beta)) + (h + dh)^2 \qquad (9)$$

L'égalité des expressions (8) et (9) conduit à l'expression :

$$4(x_p^2 + y_p^2).\left[\sin\frac{2n\phi + 2\beta + d\beta}{2}.\ \sin\frac{d\beta}{2}\right] = 2\,h.dh + (dh)^2 \qquad (10)$$

en linéarisant cette expression, il vient :

$$(x_p^2 + y_p^2).\,[\sin(n\phi + \beta).\,d\beta] = h.dh \qquad (11)$$

Le point q se déplace sur une trajectoire hélicoïdale dont la tangente en q a pour valeur :

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{-dh}{R\,d\beta} \qquad (12)$$

avec : R = Rayon du cercle circonscrit aux polygones

$$R = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} = \sqrt{x_t^2 + y_t^2} \qquad (13)$$

Compte tenu de l'expression (11), la tangente définie par (12) s'écrit :

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{-R\sin(n\phi + \beta)}{h} \qquad (14)$$

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Si le même raisonnement est conduit à partir de la barre tendue qt dont la longueur a pour valeur (3) :

$$l_{qt} = 2\,(x_r^2 + y_r^2)\,(1 - \cos\beta) + h^2 \;,$$

on obtient, pour la tangente à la trajectoire au point q, l'expression :

$$\operatorname{tg}\theta^* = \frac{-R.\sin\beta}{h} \qquad (15)$$

Il y aura compatibilité des déplacements si les valeurs de θ et θ^* sont identiques, ce qui implique :

$$n\phi + \beta = \pi - \beta + 2\,k\pi$$

soit (16)

$$n\phi + 2\beta = \pi + 2\,k\pi$$

Cette relation (16) est vérifiée pour les simplex autotendants puisqu'elle représente précisément la condition (7) caractérisant ce type de structure.

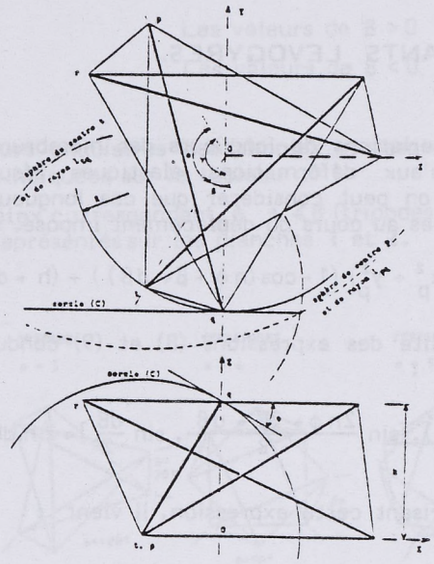


FIG. 5. Tripode autotendant.

Inversement, on peut remarquer que tout déplacement dh du plan supérieur parallèlement à lui-même (sous l'action des charges verticales par exemple) se traduit par une rotation $d\beta$, ces deux quantités étant liées par la relation (11)

II-3-2 Déplacement du point q compatible avec la géométrie de la structure

Le point q est lié aux points p et t du plan de base. Dans l'hypothèse où les longueurs des membrures et des câbles restent inchangées, le point q peut se déplacer sur le cercle (C) d'intersection des deux sphères de centre p et t et de rayons l_{pq} et l_{tq} (figures 4 et 5).

Le centre du cercle (C) est situé sur pt. Désignons par ψ l'angle formé par la tangente en q au cercle (C) et le plan supérieur contenant q (figure 5).

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{x_t - x_q}{h}$$

or

$$x_t - x_q = -R\sin\beta \qquad (17)$$

ainsi

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{-R\sin\beta}{h}$$

On note que cette valeur est identique à celle précédemment déterminée par la relation (15), ainsi

$$\psi = \theta = \theta^*$$

Cette relation nous montre qu'il y a donc compatibilité des déplacements à partir du point q pour des déplacements infinitésimaux. La structure se comporte à l'origine du déplacement comme un mécanisme, ce qui revient à conclure que **la raideur initiale de ces structures est nulle.**

Lorsque les déplacements augmentent, il y a incompatibilité des déplacements, le plan contenant le cercle (C) et le cylindre sur lequel est inscrite la trajectoire hélicoïdale n'ayant plus de point commun.

Par raison de symétrie, les déplacements s'effectuent sur le cylindre de rayon R, créant ainsi des efforts de compression dans les membrures et des efforts de traction dans les câbles. La structure cesse d'être un mécanisme, sa raideur augmente.

Remarques sur la morphologie des simplex

On remarque que pour les simplex, les barres comprimées et les câbles latéraux appartiennent respectivement à deux hyperboloïdes de révolution à une nappe concentrique, dont les deux intersections sont les cercles circonscrits aux deux polygones de base.

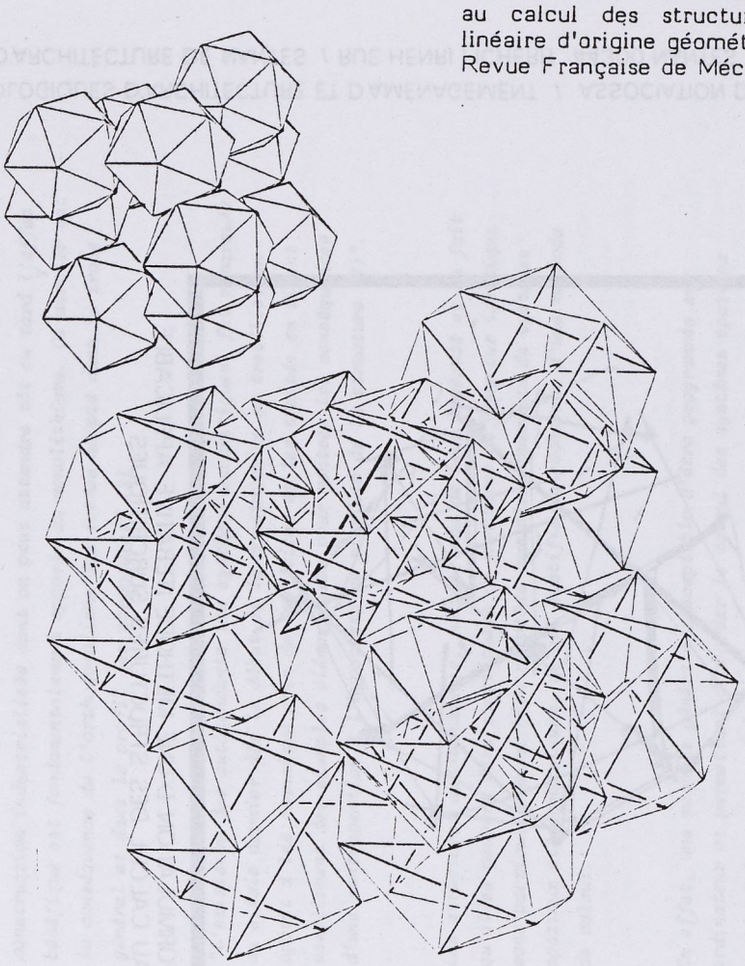
Les faces latérales des simplex sont des quadrilatères gauches formés par deux câbles des polygones de base et deux câbles latéraux. Dans le cas où n = 1, ces quadrilatères se décomposent en deux triangles ayant comme arête commune une barre comprimée.

Le rapport entre le nombre de noeuds et le nombre de membrures nécessaires à la rigidité du système est tel qu'en général le nombre de liaisons internes est inférieur à celui nécessaire à l'isostaticité de la structure. Les simplex autotendants ne sont pas des structures triangulées.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHÈQUE

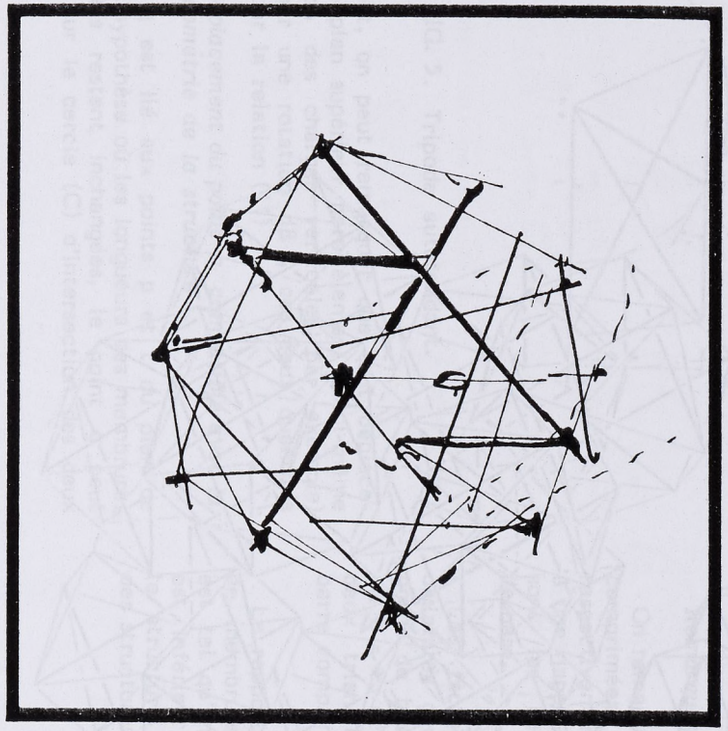
BIBLIOGRAPHIE

- D.G. EMMERICH
  - Géométrie Constructive
    Ed. U.P.A. 6 PARIS
  - Exercices de Géométrie Constructive
    Ed. ENSBA PARIS
  - SOFT Architecture – Essais sur l'autoconstruction.
    Ed. Institut d'Environnement, PARIS.
  - Constructions Autotendantes
    A.A. n° 115, mai 1964.
  - Réseaux Recherches
    T.A. n° 1, 26ème Série, 1965.
  - Réseaux Analyse des Systèmes hyperstatiques.
    Int. Conference of Space Structures, BATTERSEA 1966
    Blackwell Ed.
  - Structures
    A.A. n° 141, décembre 1968
  - Appel à Minima
    T et A n° 5, 30' Série 1970.
  - Morphologie et Structure
    A et A n° 160, mars 1972.
  - Structures autotendantes
    T et A n° 309, Mai 1976.
  - La Diversion
    A A n° 224, Dec. 1982.
- Anthony PUGH
  - On Introduction to tensigrity
    Berkeley University Press.
- R. SIESTRUNCK – J. TARDIVEAU
  - Efforts et Déformations dans les Assemblages en Treillis Critiques et Surcritiques en Elasticité Linéaire.
    C.R. Académie des Sciences, Paris - T. 280 (20 janvier 1975).
- A. CHOMARAT – J. SAVEL – J.A. SOULARD
  - Formulation d'une méthode itérative applicable au calcul des structures surcritiques.
    Revue Française de Mécanique N° 77, 1981.
  - Formulation d'une méthode itérative applicable au calcul des structures à comportement non linéaire d'origine géométrique.
    Revue Française de Mécanique n° 78, 1981.



53 CONFIGURATION AUTOTENDANTE COMPRENANT DIX ICOSAEDRES

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE



FORMULATION D'UNE METHODE ITERATIVE APPLICABLE AU CALCUL DES STRUCTURES SURCRITIQUES

Ont participé à cette recherche :

A. CHOMARAT — Docteur es Sciences,
Professeur à l'Unité Pédagogique d'Architecture de NANTES

J. SAVEL — Professeur de Mathématiques à l'Unité Pédagogique d'Architecture de NANTES.

CENTRE DE RECHERCHES MÉTHODOLOGIQUES D'ARCHITECTURE ET D'AMÉNAGEMENT / ASSOCIATION DE RECHERCHE
INTÉGRÉE DE L'UNITÉ PÉDAGOGIQUE D'ARCHITECTURE DE NANTES / RUE HENRI PICHERIT 44300 NANTES (40) 74.06.08
CRMAA

RESUME :

Les méthodes de relaxation déjà très performantes dans leurs applications aux structures rigides s'avèrent particulièrement intéressantes lorsqu'elles s'adressent aux structures à grands déplacements.

Les auteurs présentent dans cette note la formulation d'une méthode bi-itérative applicable à toutes les structures spatiales à faibles ou grands déplacements et, en particulier, aux structures surcritiques (autotendants) pour lesquelles des méthodes de calcul susceptibles d'être programmées semblent faire encore défaut.

La méthode proposée utilise simultanément un principe de relaxation de type Gauss-Seidel et une méthode matricielle, type éléments finis. Elle est applicable à tous les systèmes constitués de barres articulées et chargées par des forces concentrées aux noeuds.

ABSTRACT :

The relaxation methods, ever very interesting for the applications to rigid structures, are particularly interesting when they are used to calculate structures with large displacements.

In that publication, the authors present the development of a bi-iterative method used to all spatial structures with small or large displacements and, especially, to "tensigrity" structures for what it seems the calculus methods which can be computed, are not yet found.

That method uses, at the same time, a Gauss-Seidel relaxation principle and a finite elements matrix method. It is used with all joined bars structures, loaded with forces concentrated on the joints.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

"La tendance actuelle de la construction favorise le monolithisme aussi bien dans le métal que dans le béton. Cependant la véritable construction industrialisée dont on peut attendre tôt ou tard l'effet bénéfique est fondamentalement opposée au monolithisme. Ce dernier est la conséquence de l'orthogonalisme des formes adopté dans le tracé général et dans le profil des structures" (2)

"L'existence des autotendants (ou systèmes surcritiques) fut remarquée au siècle dernier dès le début de la construction en treillis, on apprit à les connaître afin de les éviter et les traités en citent usuellement des exemples élémentaires pour montrer les conséquences d'une contravention à l'hypothèse de rigidité de la structure (1)".

Les structures autotendantes, compte tenu de leur légèreté et du fait qu'elles peuvent être constituées de membrures de longueur identique sont particulièrement bien adaptées aux développements de systèmes spatiaux stéréométriques, ce qui justifie la recherche d'une méthode de calcul.

En effet, une méthode générale susceptible d'être programmée sur ordinateur et permettant d'aborder le calcul des systèmes spatiaux semble faire encore défaut.

125

FORMULATION D'UNE METHODE ITERATIVE APPLICABLE AU CALCUL DES STRUCTURES SURCRITIQUES

A - INTRODUCTION -

La méthode de calcul proposée s'applique aux treillis plans ou spatiaux à articulations parfaites. On suppose que sous l'action du chargement extérieur, appliqué aux noeuds, le déplacement de ces noeuds est important et entraîne une modification de la géométrie initiale de la structure.

Les efforts de traction ou de compression, exercés par les barres sur les noeuds et les coordonnées de ces derniers, lorsque la structure a atteint sa position d'équilibre finale, sont obtenus en utilisant parallèlement deux systèmes de relaxation que l'on peut définir comme suit :

A 1 - Relaxation externe -

Le principe de relaxation utilisé consiste à traduire successivement et dans un ordre indifférent l'équilibre de tous les noeuds du système susceptibles de se déplacer au cours des déformations dues à l'application des charges extérieures.

Lors de l'étude de l'équilibre d'un noeud quelconque, n, on suppose que :

- *ce noeud n est libre*
- *tous les autres noeuds sont fixes*
- *après déplacement et lorsque l'équilibre de ce noeud est atteint, il est immobilisé dans sa nouvelle position.*

Dans les paragraphes suivants cette relaxation est qualifiée d'externe.

A 2 - Relaxation interne -

Au cours de l'étude de l'équilibre d'un noeud quelconque, n, le déplacement Δ_n^1 de ce noeud est calculé à partir du chargement extérieur et des forces exercées par les barres liées à ce point (tous les autres noeuds de la structure sont supposés fixes).

La relation liant les contraintes et les déformations permet d'obtenir en fonction de Δ_n^1 les nouvelles forces exercées par les barres sur le noeud étudié.

Pour une structure dont la géométrie reste pratiquement inchangée au cours des déformations, la somme des forces appliquées au point considéré est nulle.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Par contre lorsque les déplacements Δ_n^1 ne sont plus négligeables et entraînent une modification géométrique de la structure, le vecteur-force équivalent à ces forces est différent de 0 et va induire un déplacement Δ_n^2 qui est un terme de second ordre par rapport au précédent et qui détermine ainsi une nouvelle position d'équilibre.

En répétant cette opération, que l'on désigne sous le nom de relaxation interne, on remarque ainsi que la position d'équilibre finale peut être atteinte en effectuant pour un même point une seccession de déplacements, chacun de ceux-ci étant faible par rapport au précédent.

Dans un très grand nombre de cas, et en particulier pour les structures localement rigides, le premier terme seulement pourra être retenu, l'erreur commise sur la position d'équilibre du point étudié pouvant être prise en compte dans l'itération externe suivante.

Cependant, et afin de permettre d'adapter le programme de calcul qui se rattache à cette méthode à l'ensemble des structures, la formulation a été établie avec un nombre quelconque d'itérations internes.

B - METHODE DE CALCUL -

B 1 - Hypothèses - conventions - notations -

- *Les barres du système sont articulées à leurs extrémités*
- *Les charges extérieures sont appliquées aux noeuds*
- *En un point quelconque l'effort exercé par une barre sur ce point est positif si cet effort est dirigé dans le sens du vecteur unitaire, ayant pour origine le point et porté par la barre. Avec cette convention les efforts de traction sont positifs, les efforts de compression négatifs.*

Notations :

O, x, y, z *système général d'axes orthonormes direct*

x_n^o, y_n^o, z_n^o *coordonnées initiales du point n*

x_n^{rm}, y_n^{rm}, z_n^{rm} *coordonnées du point n, au $r^{ième}$ pas d'itération interne et au $m^{ième}$ pas d'itération externe*

x_n^{*m}, y_n^{*m}, z_n^{*m} *coordonnées du point n à l'équilibre de la $m^{ième}$ itération externe*

x_n^{**}, y_n^{**}, z_n^{**} *coordonnées du point n à l'équilibre final*

./.

N_{ni}^{rm} *Effort exercé par la barre ni sur le noeud n*

N_{ni}^{m} *"*

N_{ni} *"*

} *au même pas d'itération que ceux définis ci-dessus*

l_{ni}^o *longueur initiale de la barre ni*

E_{ni}, S_{ni} *Module d'élasticité, section droite de la barre ni*

l_{ni}^{rm} *longueur de la barre ni*

$k_{ni}^{rm} = \dfrac{E_{ni}\, S_{ni}}{l_{ni}^{rm}}$ *raideur de la barre ni*

et

λ_{ni}^{rm}, μ_{ni}^{rm}, ξ_{ni}^{rm} *cosinus directeurs de la barre ni*

} *au $r^{ième}$ pas d'itération interne*

} *au $m^{ième}$ pas d'itération externe*

ΔF_n^{rm} *vecteur représentant la somme des forces s'exerçant sur le point n*

$\Delta_n^{rm} = (u_n^{rm}, v_n^{rm}, w_n^{rm})$ *déplacement du point n*

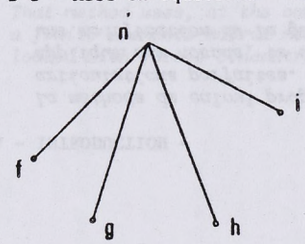
F_n^x, F_n^y, F_n^z *composantes suivant x, y, z des forces extérieures appliquées en n*

I_n *ensemble des noeuds liés au point n*

I_n^1 *ensemble des noeuds liés au point n et préalablement équilibrés*

$I_n^2 = I_n - I_n^1$

B 2 - Mise en équations - relaxation interne -



Dans cette phase, on étudie le système que l'on désigne sous le nom de pyramidal et constitué par plusieurs barres articulées ayant toutes une même extrémité libre appelée sommet. L'autre extrémité de chaque barre est articulée en un point fixe. Bien que l'ensemble de ces points fixes ne soit pas situé dans un même plan, on les désigne sous le nom de "base du pyramidal".

On suppose connues les coordonnées des noeuds du pyramidal de sommet n au $r^{ième}$ pas d'itération interne et on se propose de déterminer les coordonnées au pas suivant r + 1

On rappelle que seul le sommet peut se déplacer, les coordonnées des points de la base sont donc inchangées.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Au $r^{ième}$ pas d'itération interne, les forces exercées par les barres sur le sommet n, obtenues à partir de la relation linéaire contrainte-déformation, ont pour expression :

$$N_{ni}^{rm} = k_{ni}^{rm} \quad (l_{ni}^{rm} - l_{ni}^{o}) \quad \text{pour} \quad i \in I_n$$

la longueur de la barre l_{ni}^{rm} est définie à partir des coordonnées des noeuds

$$l_{ni}^{rm} = \left[(x_n^{rm} - x_i^{*m'})^2 + (y_n^{rm} - y_i^{*m'})^2 + (z_n^{rm} - z_i^{*m'})^2 \right]^{1/2}$$

avec $m' = m$ *si* $i \in I_n^1$

et $m' = m - 1$ *si* $i \in I_n^2$

Les forces exercées par les barres sur le sommet n étant ainsi déterminées, on peut écrire :

$$x_n^{(r+1)m} = x_n^{rm} + u_n^{rm}$$

$$y_n^{(r+1)m} = y_n^{rm} + v_n^{rm}$$

$$z_n^{(r+1)m} = z_n^{rm} + w_n^{rm}$$

Avec $\Delta_n^{rm} = (u_n^{rm}, v_n^{rm}, w_n^{rm})$ *donné par la relation*

$$\Delta F_n^{rm} = K_{\alpha\alpha}^{rm} \cdot \Delta_n^{rm}$$

dans laquelle

$$\Delta F_n^{rm} = \begin{pmatrix} \sum N_{ni}^{rm} \cdot \lambda_{ni}^{rm} + F_n^x \\ \sum N_{ni}^{rm} \cdot \mu_{ni}^{rm} + F_n^y \\ \sum N_{ni}^{rm} \cdot \xi_{ni}^{rm} + F_n^z \end{pmatrix}$$

toutes les sommes $\sum$ sont étendues à $i \in I_n$

./.

et

$$K_{\alpha\alpha}^{r} = \begin{pmatrix} k_{ni}^{rm} \cdot \lambda_{ni}^{rm\,2} & & & \text{S Y M} \\ k_{ni}^{rm} \cdot \lambda_{ni}^{rm} \cdot \mu_{ni}^{rm} & k_{ni}^{rm} \cdot \mu_{ni}^{rm\,2} & & \\ k_{ni}^{rm} \cdot \lambda_{ni}^{rm} \cdot \xi_{ni}^{rm} & k_{ni}^{rm} \cdot \mu_{ni}^{rm} \cdot \xi_{ni}^{rm} & k_{ni}^{rm} \cdot \xi_{ni}^{rm\,2} & \end{pmatrix}$$

sommes étendues à $i \in I_n$

Rappelons en effet que la relation force-déplacement s'écrit dans le cas général

$$F = K \cdot \Delta$$

et en effectuant les partitions correspondant aux forces connues F_n cette relation peut se mettre sous la forme :

$$\begin{pmatrix} F_n \\ \hline \tilde{F} \end{pmatrix} = \left(\begin{array}{c|c} K_{\alpha\alpha} & K_{\alpha\beta} \\ \hline K_{\beta\alpha} & K_{\beta\beta} \end{array}\right) \begin{pmatrix} \Delta_n \\ \hline \tilde{\Delta} \end{pmatrix}$$

avec $\tilde{F}$ composantes des forces inconnues

$\tilde{\Delta}$ déplacements connus ou imposés

Ainsi $\quad F_n = K_{\alpha\alpha} \cdot \Delta_n + K_{\alpha\beta} \tilde{\Delta}$

Dans le cas particulier d'un pyramidal les points de base étant supposés fixes

$$\tilde{\Delta} = 0$$

et $\quad F_n = K_{\alpha\alpha} \cdot \Delta_n$

Ainsi tous les éléments sont déterminés pour passer d'un pas d'itération donné au pas suivant et pour calculer les forces et les déplacements à chacun de ces pas.

Les coordonnées du sommet n tendent lorsque r augmente indéfiniment vers les valeurs exactes définissant la position d'équilibre, que l'on désigne par :

$$x_n^{*m}, \quad y_n^{*m}, \quad z_n^{*m}$$

tandis que les forces exercées par les barres tendent vers les valeurs

$$N_{ni}^{*m}$$

./.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

B 3 - Relaxation externe -

Dans cette phase de relaxation externe on étudie l'équilibre d'un noeud quelconque n de la structure au cours de la même phase d'itération externe.

Le pyramidal de sommet n est défini par les coordonnées de son sommet et des points constituant la base.

On a ainsi :

coordonnées du sommet $\left| \begin{array}{l} x_n^{*m-1} \\ y_n^{*m-1} \\ z_n^{*m-1} \end{array} \right.$

coordonnées d'un point i de la base :

$$\left| \begin{array}{l} x_i^{*m-1} \\ y_i^{*m-1} \\ z_i^{*m-1} \end{array} \right. \quad \text{pour } i \in I_n^2 \quad \text{et} \quad \left| \begin{array}{l} x_i^{*m} \\ y_i^{*m} \\ z_i^{*m} \end{array} \right. \quad \text{pour } i \in I_n^1$$

Ces valeurs initiales fixent la géométrie du pyramidal qui peut ainsi être étudié en relaxation interne comme indiqué dans le paragraphe précédent.

Lorsque m tend vers l'infini, les valeurs précédentes tendent vers les valeurs exactes définissant l'équilibre :

$$x_i^{**}$$

$$y_i^{**}$$

$$z_i^{**}$$

Les forces exercées par les barres sur le noeud n tendent vers les valeurs

$$N_{ni}^{**}$$

./.

B 4 - Précontrainte dans les barres

Une précontrainte dans une ou plusieurs barres du système est obtenue en modifiant la ou les longueurs initiales des barres intéressées d'une quantité correspondant à la force de précontrainte requise, par simple application de la relation contrainte-déformation.

Informatisation de la méthode

Il convient de noter que la formulation proposée ne peut se concevoir que si elle est liée à une résolution par ordinateur. Cependant, la programmation de cette méthode, à l'encontre de celles utilisées dans les méthodes globales de résolution (Méthode des forces ou des déplacements), nécessite un encombrement mémoire extrêmement réduit.

C - APPLICATIONS

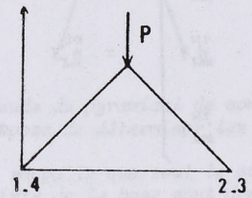
- *La méthode de calcul proposée est applicable à toutes les structures articulées isostatiques ou hyperstatiques (intérieurement ou extérieurement), même si les déplacements sont grands par rapport aux longueurs des barres.*

- *Elle est également applicable à un certain nombre de structures, dites autotendantes, qui, du fait de leur nombre de barres et de noeuds ou de leur configuration géométrique, sont stables, mais possèdent, lorsqu'elles ne sont pas chargées, une rigidité très faible, voir nulle. Cette propriété interdit d'utiliser pour leur calcul les méthodes des forces ou des déplacements (dites méthodes globales) dans lesquelles la rigidité, supposée constante, est calculée avant l'application du chargement. Cette rigidité s'améliore lorsque la structure se déforme sous l'action d'un chargement extérieur ou d'une précontrainte interne.*

- *Pour illustrer la méthode de calcul proposée, nous avons choisi de traiter des exemples appartenant à ces catégories de modèles, à savoir structures à grands déplacements et structures autotendantes.*

C_1 - Structures à grands déplacements

1.1.

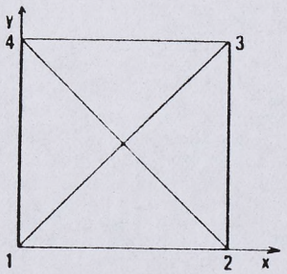


On se propose d'étudier une pyramide formée de 4 barres parfaitement articulées aux noeuds 1.2.3.4. (fixes dans le plan horizontal), chargée verticalement au sommet 5 par une force P

Afin d'obtenir de grands déplacements, on admet par hypothèse :

- *que le module d'élasticité du matériau constituant les barres est faible,*

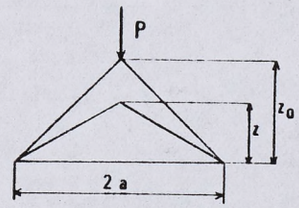
Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE



- que le matériau reste dans le domaine élastique bien que les déformations soient très importantes.

- qu'aucun flambement n'apparaît dans les barres malgré la valeur importante de leur élancement.

Physiquement, ce système peut être réalisé en remplaçant chaque barre par un ensemble de deux tubes coulissant l'un dans l'autre et d'un ressort linéaire.



1.2 - Etude théorique

On désigne par :

z, hauteur de la pyramide déformée sous l'action de la charge P appliquée au sommet,

zo, hauteur de la pyramide avant application du chargement,

lo, longueur initiale d'une barre. lo = 150 cm

2a, longueur du côté du carré de base - 2a = 100 cm

E, module d'élasticité équivalent - $E = 2.10^4$ bars

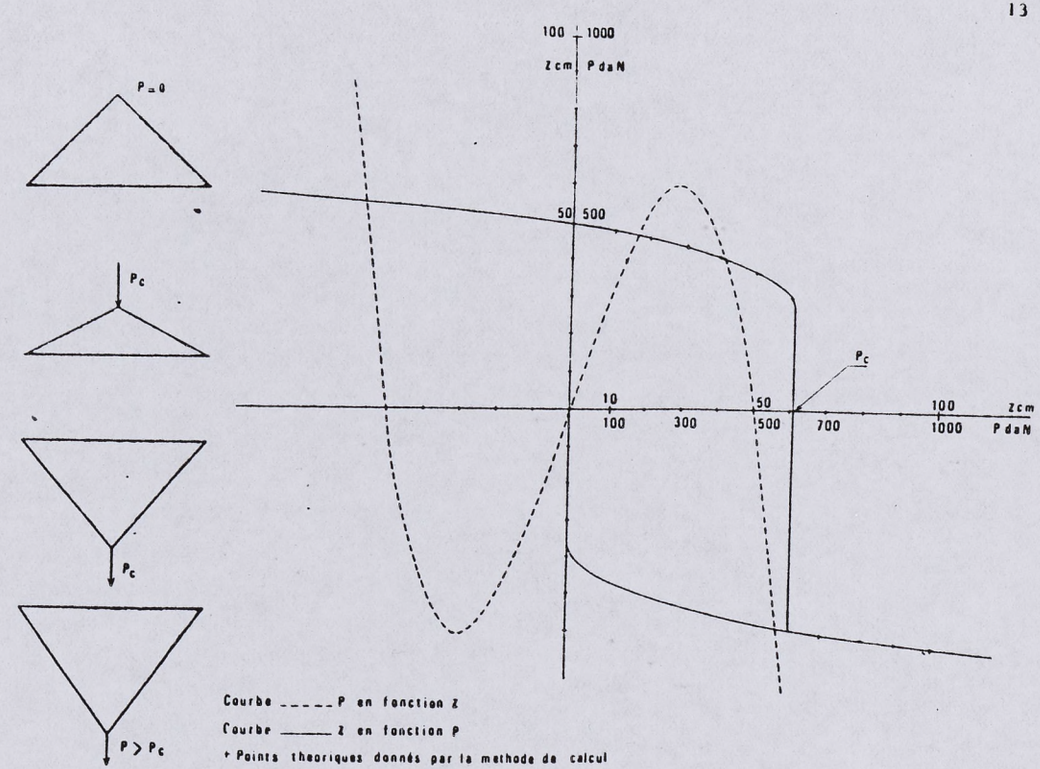
S, section droite équivalente des barres. S = 1 cm2

Les relations fondamentales forces-déplacements dans le domaine élastique permettent d'obtenir en traduisant l'équilibre du sommet :

$$P = \frac{4\,S.E}{lo} \cdot \frac{z\left[\sqrt{2a^2 + z^2} - lo\right]}{\sqrt{2a^2 + z^2}}$$

Ainsi, pour chaque valeur de z, correspondant à un certain état de déformation, on peut déterminer la charge P nécessaire pour maintenir l'équilibre.

Les valeurs de P en fonction de z sont représentées sur le croquis ci-après par la courbe en pointillés, symétrique par rapport à l'origine, et qui représente un maximum Pm pour une valeur de z comprise entre 0 et zo.



La courbe traduisant le comportement de la structure sous l'action du chargement, soit z = F(P) est obtenue à partir de la précédente, par simple symétrie par rapport à la droite P = z.

Cette courbe présente une partie verticale dont l'abscisse est égale à Pm. En effet, lorsque la charge appliquée au sommet augmente progressivement, pour la valeur Pm, la pyramide s'inverse pour prendre une nouvelle position d'équilibre directement déterminée à partir de la fonction P = F(z).

Les valeurs obtenues avec la méthode de calcul proposée sont parfaitement confondues avec celles données par l'étude théorique.

Pour une charge arbitraire, la méthode donne directement le point d'équilibre de la structure en tenant compte simultanément de l'équilibre des forces et de la comptabilité des déformations, traduisant ainsi le comportement non-linéaire de la structure même dans le cas où les déformations sont très importantes.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

C_2 - Applications aux structures autotendantes

Etude d'un tétracaïdécaedre autotendant.

Cette structure spatiale est constituée de 60 barres et 24 noeuds. L'ensemble des barres comporte 12 mats rigides et 48 cables. Quelque soit le mode de chargement, les mats travaillent en compression et les câbles en traction, ce qui nécessite l'application d'une pré-contrainte à l'ensemble du système avant sa mise en charge.

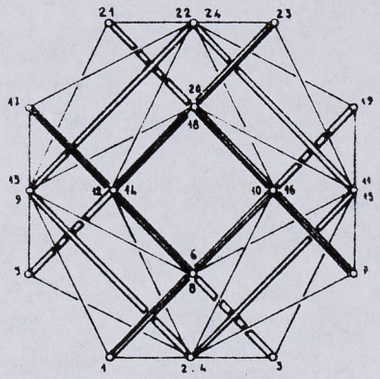
Toutes les barres sont parfaitement articulées à leurs extrémités et les liaisons sur le sol sont également réalisées par des articulations sphériques dont les coordonnées sont fixes dans le plan horizontal.

Si on définit le taux surcritique par le nombre, s, de barres qui manquent au système pour satisfaire à la condition isostatique $b = 2n - 6$, le taux surcritique du tetracaïdecaèdre est égal à $s = 6$, d'où l'impossibilité d'aborder le calcul de cette structure par les méthodes classiques.

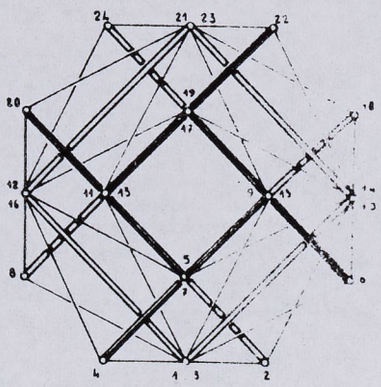
Dans l'exemple retenu, afin de mettre en évidence les possibilités de la méthode itérative, les dimensions des barres et celles des cables en particulier ainsi que les valeurs des précontraintes initiales ont été choisies de telle sorte que les déplacements des noeuds soient très importants. Cependant, il convient de noter qu'une structure de même morphologie mais avec des caractéristiques différentes pourrait avoir des déplacements très nettement inférieurs à ceux obtenus.

Définition de la structure.

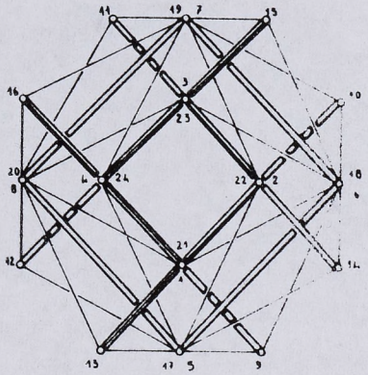
Noeuds	Coordonnées (cm)			Noeuds	Coordonnées (cm)			Noeuds	Coordonnées (cm)		
	x	y	z		x	y	z		x	y	z
1	960	480	0	9	1440	0	960	17	960	0	1440
2	1440	960	0	10	1920	1440	960	18	1920	960	1440
3	960	1440	0	11	480	1920	960	19	960	1920	1440
4	480	960	0	12	0	480	960	20	0	960	1440
5	960	0	480	13	480	0	960	21	960	480	1920
6	1920	960	480	14	1920	480	960	22	1440	960	1920
7	960	1920	480	15	1440	1920	960	23	960	1440	1920
8	0	960	480	16	0	1440	960	24	480	960	1920



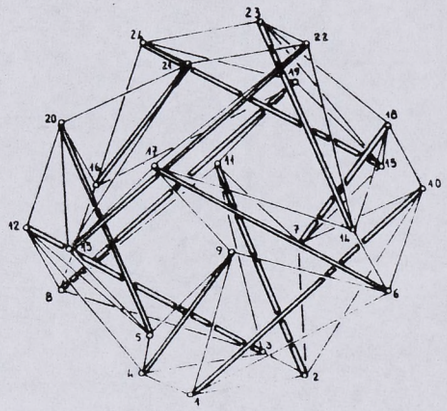
Vue de profil



Vue de face



Vue de dessus



Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Caractéristiques des barres

Barres	Longueur cm	Section cm2	Module E daN/cm2	Précontrainte initiale daN
1.[illegible] - 2.3 - 3.4 - 1.4 - 5.9 - 9.17	678.8	2.44	$15\ 10^5$	0
[illegible] - 5.13 - 6.10 - 10.18 - 14.18 - 6.14	678.8	2.44	$15\ 10^5$	0
7.[illegible] - 11.19 - 15.19 - 7.15 - 8.12 - 12.20	678.8	2.44	$15\ 10^5$	0
16.[illegible] - 8.16 - 21.22 - 22.23 - 23.24 - 21.24	678.8	2.44	$15\ 10^5$	0
1.[illegible] - 6.9 - 1.9 - 2.7 - 7.10 - 2.10	1175.8	2.44	$15\ 10^5$	0
3.[illegible] - 8.11 - 3.11 - 4.5 - 5.12 - 4.12	1175.8	2.44	$15\ 10^5$	0
13.[illegible] - 20.21 - 13.21 - 14.17 - 17.22 - 14.22	1175.8	2.44	$15\ 10^5$	0
15.[illegible] - 18.23 - 15.23 - 16.19 - 19.24 - 16.24	1175.8	2.44	$15\ 10^5$	0
1.1[illegible] - 2.11 - 3.12 - 4.9 - 5.20 - 6.17 7.1[illegible] - [illegible].19 - 13.12 - 14.23 - 15.24 - 16.21	1663.6	40.20	$2\ 10^6$	$-\ 4.10^4$

Chargement

a - Précontrainte Pr

La précontrainte est obtenue en supposant que les 12 mats ont une longueur initiale supérieure à celle fixée par la géométrie de l'ensemble. Mis en place dans le système avant le déblocage des noeuds, ces mats sont, dans l'exemple étudié, soumis à une compression de 4.10^4 daN.

b - Chargement extérieur Ce

Noeuds 9. 10. 11. 12.	$F_Z = -\ 500$ daN	$F_x = F_y = 0$
Noeuds 17. 18. 19. 20	$F_Z = -\ 750$ daN	$F_x = F_y = 0$
Noeuds 21. 22. 23. 24	$F_Z = -\ 1250$ daN	$F_x = F_y = 0$

(les charges sont appliquées sur la structure initialement précontrainte (Pr + Ce dans le tableau des résultats).

Résultats théoriques

Barres	Effort dans les barres (daN)		Déplacements des noeuds (cm)			
	Chargement Pr	Chargement Pr + Ce	Noeuds	Chargement Pr + Ce		
				Dx	Dy	Dz
1.2 - 1.4 - 2.3 - 3.4	0	0	1.2.3.4	0	0	0
1.9 - 2.10 - 3.11 - 4.12	1720	614	5	21.9	3.8	- 8.8
1.10 - 2.11 - 3.12 - 4.9	- 3800	- 10454	6	- 3.9	22.0	- 8.7
2.7 - 3.8 - 4.5 - 1.6	1830	7650	7	- 22.2	- 3.9	- 8.9
5.9 - 6.10 - 7.11 - 8.12	1590	6818	8	3.8	- 22.1	- 9.1
5.12 - 6.9 - 7.10 - 8.10	1810	7160	9	15.4	13.8	- 0.8
5.20 - 6.17 - 7.18 - 8.19	- 3865	- 15197	10	- 14.0	15.6	- 0.8
6.14 - 7.15 - 8.16 - 5.13	1588	5793	11	- 15.6	- 14.0	- 0.8
9.17 - 10.18 - 11.19 - 12.20	1557	4858	12	13.7	- 15.4	- 0.8
13.17 - 14.18 - 15.19 - 16.20	1572	6160	13	- 48.8	32.5	- 91.2
13.20 - 14.17 - 15.18 - 16.19	1830	7442	14	- 32.7	- 48.8	- 91.2
13.22 - 14.23 - 15.24 - 16.21	- 3870	- 13870	15	48.2	- 32.6	- 91.0
14.22 - 15.23 - 16.24 - 13.21	1825	4630	16	32.4	48.3	- 91.0
17.22 - 18.23 - 19.24 - 20.21	1810	7415	17	- 55.9	3.0	- 83.4
21.22 - 22.24 - 22.23 - 23.24	1584	4810	18	3.2	- 55.9	- 83.4
			19	55.5	- 3.4	- 83.1
			20	3.1	55.6	- 83.0
			21	- 21.9	- 0.5	- 87.2
			22	0.08	- 22.2	- 87.2
			23	21.8	- 0.2	- 87.1
			24	- 0.2	21.5	- 87.1

Les valeurs des efforts figurant dans le tableau sont les moyennes des valeurs obtenues pour chacune des quatre barres figurant dans la ligne correspondante. Ecart maximum inférieur à 1 % et voisin de 1 0/00 pour la quasi-totalité des cas.

Convergence de la méthode

Les résultats ci-après représentent les valeurs successivement obtenues pour un ensemble de barres, travaillant d'une manière analogue, en fonction du nombre d'itérations externes.

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

Nombre d'iterations	5.13	6.14	7.15	8.16	Ecart moyen entre 10 iterations
0	1588	1585	1588	1591	-
10	1862	1863	1861	1859	270
20	3147	3148	3146	3142	1285
30	4276	4278	4274	4270	1130
40	4992	4995	4987	4983	720
50	5378	5382	5374	5367	390
60	5572	5575	5568	5562	200
70	5669	5672	5660	5657	100
80	5718	5723	5714	5708	60
90	5748	5751	5743	5736	30

On remarque que les autotendants représentent des cas très particuliers de structures nécessitant un nombre relativement important d'itérations en raison de leur morphologie qui se traduit par une valeur très faible de leur raideur initiale.

Dans l'exemple étudié, les déplacements des noeuds 5.6.7 et 8 sont de l'ordre de 9 cm, ceux des noeuds 13.14.15.16 voisins de 91 cm. Des déplacements aussi importants par rapport aux longueurs des barres (680 cm) ne se rencontrent que très exceptionnellement.

D - CONCLUSION

Les exemples retenus ont été choisis en raison de leurs particularités qui les rendent inaccessibles aux calculs classiques.

Dans le cadre de ce rapport, nous ne souhaitions pas développer le comportement de ces structures, en particulier celui des autotendants, mais simplement noter que le calcul de ces structures est possible avec la méthode itérative quelque soit la complexité du système.

En conclusion, cette formulation qui présente en outre l'avantage de nécessiter un encombrement mémoire très réduit par rapport aux autres méthodes, permet d'étudier tous les systèmes articulés et le pouvoir traiter des déformations aussi grandes qu'on les veut sans se soucier à priori de la nature de ces systèmes.

BIBLIOGRAPHIE

(1) SIESTRUNCK (R.), TARDIVEAU (J.)

Efforts et déformations dans les assemblages en treillis critiques et surcritiques en élasticité linéaire.
C.R. Académie des Sciences, Paris - T. 280 (20 janvier 1975)

(2) EMMERICH (D.G.)

Architecture d'Aujourd'hui n° 116 - (1964)
Technique et Architecture n° 26 - (1966)

(3) ZIENKIEWICZ (J.C.)

Finite Element Methods in Stress Analysis
Holland et Bell, Trondheim - (1969)

(4) VARGA (R.S.)

Matrix iterative analysis
Prentice Hall, New Jersey - (1965)

(5) SAATY (Thomas L.)

Mathematical Methods of Operations Research
Mc Graw-Hill Book Company, New-York - (1959)

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

BIBLIOGRAPHIE

CONFERENCE INTERNATIONAL ON SPACE STRUCTURES
University of Battersea Londres 1966
Ed. Blackwell

CONFERENCE INTERNATIONAL ON PRESTRESSED METAL STRUCTURES
Leningrad 1971

EMMERICH
Exercices de géométrie constructive 1970
Réédition Ed. de la Villette. Paris . 1985

Soft Architecture - Essai sur l'autoconstruction
Institut de l'Environnement 1974

Exercices. Travaux d'étudiants 2
Unité Pédagogique N° 6 Paris 1982

Histoire de l'Ars - Le Ricolais
Dossier de l'Atelier de Recherche Structurale UP.6 1984

FULLER
Synergetics
M.C. Millan , New York 1975

World Design Science Decade 1965-1975
Carbondale . Illinois

LE RICOLAIS
A la Recherche d'une Mécanique des Formes
Palais de la Découverte 1965

VIA . Graduate School of Fine Arts
University of Pennsylvania 1973

WACHSMANN
Turn Point in Building
Reinhold . New York

REVUES

ARCHITECTURE D'AUJOURD'HUI
115-1964 141-1968 160-1972 224-1982

ARCHITECTURAL DESIGN
3-1960 7-1961 7-1967 9-1970

TECHNIQUES ET ARCHITECTURE
5-1963 1-1965 2-1966 5-1969 2-1970 5-1970
5-1972 309-1976

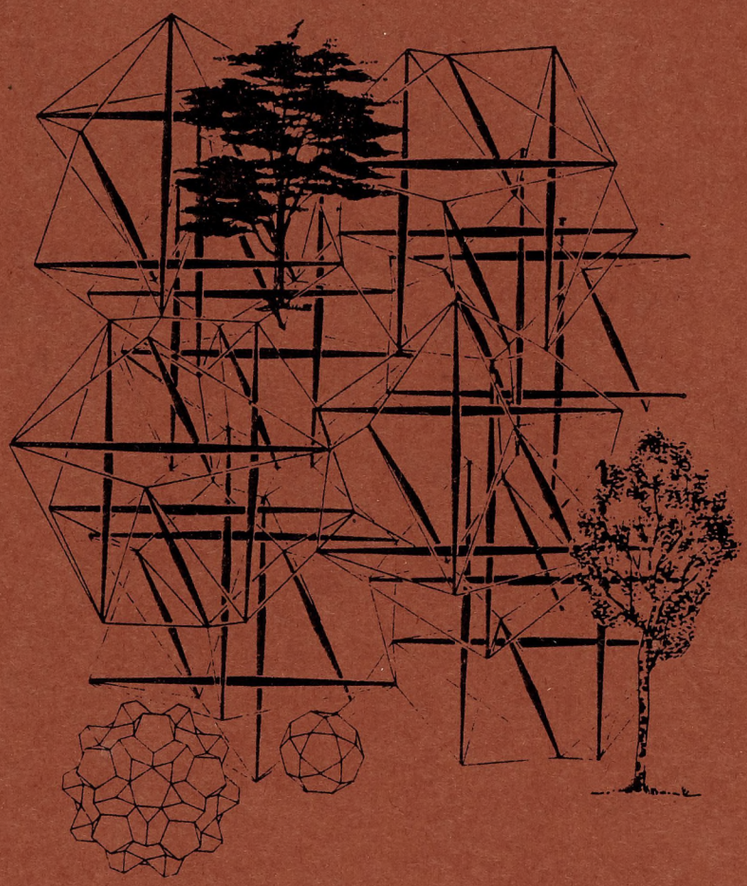
ZODIAC
21-1972 22-1973

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE

TABLE DES MATIERES

	Page
LA FORME CREE LA FONCTION	3
L'HISTORIQUE DES STRUCTURES AUTOTENDANTES	4
LES STRUCTURES METALLIQUES PRECONTRAINTES	36
LA TECHNIQUE DES STRUCTURES AUTOTENDANTES	43
Les systèmes monolithiques et articulés	43
Les principes de construction des autotendants	45
Les solides autotendants élémentaires	48
Les mâts et charpentes linéaires	50
Les réseaux et coupoles à double nappe	53
Les empilements autotendants	54
POSSIBILITES D'APPLICATION DES AUTOTENDANTS	55
HABITACLES ET ESPACES POLYVALENTS	56
Abris d'urgence	57
Pavillons d'exposition	59
Réseaux extensibles	60
Trame habitable	62
Coupole à double nappe	64
Ossature spatiale	65
CONCOURS INTERNATIONAL DE TETE DEFENSE	66
UN ETABLISSEMENT FLOTTANT A USAGE HOTELIER	74
ANTENNES, PYLONES, TOURS	78
PONT SUR LA MANCHE	80
NASSES POUR AQUACULTURE	83
AEROTOR - GENERATEURS EOLIENS	86
STATION ORBITALE	89
ANNEXES	91
CONSTRUCTIONS AUTOTENDANTES A.A. 115	92
RESEAUX International Conference on Spaces Structures	95
ESSAI D'UNE MAQUETTE , CEBTP.	108
EFFORTS ET DEFORMATIONS DANS LES ASSEMBLAGES en treillis critiques et surcritiques Mécanique théorique. Acad.Sc. Paris par J. Tardiveau et R. Siestrunck	113
ETUDES DES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES particulières aux structures autotendantes par A. Chomarat, A. Chassagnoux et J. Savel	117
FORMULATION D'UNE METHODE ITERATIVE applicable au calcul des structures surcritiques par A. Chomarat et J. Savel	124
BIBLIOGRAPHIE	133

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE



0 0038762

Cité de l'architecture & du patrimoine
BIBLIOTHèQUE